

Regimes de Neutro em Média Tensão em Subestações de Distribuição de Energia Elétrica

HUGO RICARDO DOS SANTOS TAVARES

Janeiro de 2013

Regimes de Neutro em Média Tensão em Subestações de Distribuição de Energia Elétrica

Hugo Ricardo dos Santos Tavares

Dissertação realizada no âmbito do

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

sob orientação do Professora Doutora Teresa Nogueira e Eng^o. Jorge Santos

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200 - 072 Porto, Portugal

Janeiro 2013

*“Nunca tenha a certeza de nada, porque
a Sabedoria começa com a dúvida.”*

(Sigmund Freud)

AGRADECIMENTOS

Gostava de agradecer em primeiro lugar aos meus orientadores, Professora Doutora Teresa Nogueira do Instituto Superior de Engenharia do Porto e Engenheiro Jorge Santos da EDP Distribuição pela preciosa ajuda nesta fase final da conclusão do mestrado.

Aos meus Pais e Irmã.

Ao Engenheiro Ricardo Prata e Eduardo Quaresma da EDP Distribuição de Lisboa pela disponibilidade e dúvidas esclarecidas relativas ao software DPLAN.

Ao Engenheiro Frantisek Zak da empresa EGE da Republica Checa pelas dúvidas esclarecidas por correio eletrónico e por toda a informação disponibilizada.

A todos os meus colegas do Instituto Superior de Engenharia do Porto, pelos momentos de trabalho na sala I203, pelo apoio e interesse demonstrado ao longo destes últimos meses.

À EDP pela oportunidade para a realização da minha dissertação.

A todos os que de algum modo contribuíram para que pudesse realizar este trabalho, o meu sincero reconhecimento e profunda gratidão!

RESUMO

A existência do regime de neutro em subestações de distribuição de energia elétrica é essencial para o bom funcionamento de toda a rede. Existe um vasto leque de opções no que diz respeito aos regimes de neutro. Cada opção tem as suas vantagens e desvantagens, e cabe às empresas do setor elétrico a escolha do regime de neutro mais adequado em função das características da rede. A escolha do regime de neutro tem influência direta no desempenho global de toda a rede de média tensão.

O principal objetivo desta dissertação é o estudo e a análise das vantagens e inconvenientes dos vários regimes de neutro: neutro isolado, neutro impedante, ligado diretamente à terra, neutro ressonante, analisando as suas vantagens e inconvenientes. É feito um estudo aprofundado do regime de neutro ressonante, também designado por regime de neutro com a Bobine de Petersen. Este trabalho descreve, ainda, de forma sucinta a situação de Portugal relativamente aos regimes de neutro que utiliza e a sua perspetiva futura.

Por fim é apresentado um caso de estudo, que diz respeito a uma rede de média tensão (30 kV) alimentada pela subestação de Serpa. Foram estudados os regimes de neutro como a bobine de Petersen, reatância de neutro e neutro isolado. Foi também estudada a influência na ocorrência de um defeito fase-terra e a influência na ocorrência de defeitos francos e resistivos em vários pontos da rede.

ABSTRACT

The existence of the neutral earthing in distribution substations of electricity is essential to the proper functioning of the entire network. There is a wide range of options in neutral earthing. Each option has its advantages and disadvantages and it is up to the electric companies to choose the most appropriate system depending on the characteristics of the network. The choice of the neutral earthing has a direct influence on the overall performance of the entire medium voltage network.

The main objective of this dissertation is the study and analysis of the advantages and disadvantages of the various neutral earthing: isolated neutral, neutral impedant, connected directly to earth, resonant grounding, analyzing their advantages and drawbacks. A thorough study of the resonant grounding, also called the neutral earthing with the Petersen Coil, was made. This study also briefly describes the situation of neutral earthing and its future perspective in Portugal.

We present the study of a network of medium voltage (30 kV) fed by Serpas' substation. We studied neutral earthing, as Petersen coil, reactor and neutral ungrounded. The influence on the occurrence of a phase to ground fault, the frank and resistive defects at several points of the network were also studied.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABELAS	xiv
ABREVIATURAS.....	xvi
SIMBOLOGIA.....	xvii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos do Trabalho.....	2
1.3 Estrutura da Dissertação.....	3
Capítulo 2	5
Regimes de neutro	5
2.1 Introdução.....	5
2.1.1 Impacto nas características de operação	8
2.1.2 Impacto nas especificações construtivas da rede.....	8
2.2 Regimes de neutro	9
2.2.1 Sistemas com 3 condutores.....	10
2.2.2 Sistemas com 4 condutores.....	11
2.2.3 Vantagens e desvantagens dos diversos Regimes de Neutro.....	14
2.2.4 Ligações do Regime de Neutro.....	15
2.2.5 Dificuldades e critérios de seleção	15
2.2.6 Neutro isolado e sistema de proteção.....	17
2.2.7 Neutro ligado diretamente à terra	20
2.2.7.1 Sem o sistema de limitação do potencial à terra (Neutro não distribuído): ..	21
2.2.7.2 Com o sistema de limitação do potencial à terra (Neutro distribuído):.....	21
2.2.7.3 Função de proteção.....	23
2.2.8 Neutro ligado à terra por impedância	24
2.2.8.1 Reatância de Neutro e sistema de proteção	25
2.2.8.2 Resistência de Neutro e sistema de proteção.....	27
2.2.8.3 Bobine de Petersen ou Neutro ressonante	30

Aplicações da Bobine de Petersen	37
3.1 Situação existente na rede portuguesa	37
3.2 Mudanças de Regime de Neutro	37
3.3 Necessidade do Neutro Ressonante.....	38
3.4 Implementação do Neutro Ressonante em Portugal	40
3.5 Análise de sistemas de distribuição compensados.....	41
3.6 Caraterísticas da Bobine de Petersen	41
3.6.1 Regulação Contínua:	43
3.6.2 Caraterísticas técnicas	44
3.6.3 Caraterísticas de configuração.....	45
3.6.3.1 Intervalos de funcionamento da impedância	45
3.6.3.2 Intervalos de funcionamento da corrente de neutro	46
3.6.4 Correntes de defeitos admissíveis.....	47
3.6.5 Transformador para injeção de corrente homopolar para sintonização da bobine 47	
3.6.6 Comando de controlo da bobine de Petersen	47
3.7 Sistema de proteção para o Neutro Ressonante	48
3.8 Detecção de defeitos à terra com o relé 7SN60 da SIEMENS	50
3.8.1 Proteção de defeitos sensíveis à terra.....	55
3.8.2 Proteção sensível Watimétrico	55
3.9 Métodos de deteção de defeitos à terra para redes de distribuição usando a bobine de Petersen	57
3.9.1 Deteção da tensão	59
3.9.2 Método <i>Wattimétrico</i>	59
3.10 Novos métodos de deteção de defeitos à terra para redes de distribuição usando a bobine de Petersen	61
3.10.1 Método da Condutância	61
3.10.2 Método da Condutância Incremental.....	62
3.11 Custo da Bobine de Petersen.....	63
3.11.1 Caraterísticas da bobine de Petersen	63
3.11.2 Dimensionamento da potência reativa da bobine	63
Capítulo 4	65
Análise de um caso de estudo	65
4.1 Introdução.....	65
4.2 Modelização da bobine de Petersen	65
4.3 Rede de estudo.....	66

4.3.1	Defeitos Francos.....	68
4.3.2	Defeitos resistivos	72
4.3.2.1	<i>Defeitos resistivos (10 Ohms)</i>	72
4.3.2.2	<i>Defeitos resistivos (100 Ohms)</i>	75
4.3.2.3	<i>Defeitos resistivos (500 Ohms)</i>	78
4.3.2.4	<i>Defeitos resistivos (1000 Ohms)</i>	80
Capítulo 5	85
Conclusões	85
5.1	Conclusões.....	85
5.2	Trabalhos futuros a realizar	86
BIBLIOGRAFIA	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ponto de Neutro de um Sistema Trifásico ligado em Estrela.....	5
Figura 2.2 - Circuito equivalente de defeito à terra	15
Figura 2.3 - Corrente defeito capacitiva num sistema de neutro isolado.....	18
Figura 2.4 - Detecção de um defeito.....	19
Figura 2.5 – Defeito à terra no regime de neutro ligado diretamente à terra.....	20
Figura 2.6- Esquema do regime de neutro com o neutro não distribuído	21
Figura 2.7 - Esquema do regime de neutro com o neutro distribuído.....	22
Figura 2.8 - Proteção de defeitos à terra 51N.....	23
Figura 2.9 - Reatância de neutro com o neutro acessível	25
Figura 2.10 - Reatância de neutro sem o neutro acessível	27
Figura 2.11 - Defeito à terra no regime de neutro ligado à terra por uma resistência.....	27
Figura 2.12 - Transformador monofásico com carga resistiva	28
Figura 2.13 - Proteção de defeitos à terra	29
Figura 2.14 - Princípio de funcionamento da Bobine de Petersen	31
Figura 2.15 - Defeito à terra usando a bobine de Peterson.....	34
Figura 2.16 - Vetor das correntes durante um defeito à terra.....	35
Figura 3.1 – Defeito usando Bobine de Petersen.....	42
Figura 3.2 - Bobine de Petersen, Exemplo da EGE	43
Figura 3.3 - Descrição pormenorizada da Bobine de Petersen (Modelo ASR 1.6 da EGE).....	43
Figura 3.4 - Esquema pormenorizado do interior da Bobine de Petersen.....	44
Figura 3.5 - Diagrama esquemático da Bobine de Petersen	47
Figura 3.6 - Tensões normais de funcionamento.....	49
Figura 3.7 - Tensões do sistema em caso de defeito	49
Figura 3.8 – Relé de deteção de defeitos à terra (7SN60) da SIEMENS	50
Figura 3.9 - Esquema de ligação dos equipamentos de medição da corrente	51
Figura 3.10 - Funcionamento do relé em caso de um defeito	51
Figura 3.11 - Sistema com defeito no regime de neutro com a bobine de Petersen	52
Figura 3.12 – Distribuição das correntes na fase C durante um defeito numa rede radial	53
Figura 3.13 – Fase C com defeito à terra no regime usando a bobine de Petersen: Caso teórico – Sem resistência presentes no XL ou XC.....	53
Figura 3.14 – Correntes residuais homopolares	54
Figura 3.15 - Fase C com defeito à terra no regime usando a bobine de Petersen: Caso pratica – Com resistência presentes no XL ou XC.....	54
Figura 3.16 - Componentes resistivas da corrente	56
Figura 3.17 - Diagrama fasorial típico para defeitos à terra e caraterísticas de operação do relé <i>watimétrico</i> (32 W) usado em sistemas compensados	60
Figura 3.18 - Diagrama lógico simplificado de um elemento do relé <i>watimétrico</i> (32 W)	60
Figura 3.19 - Elemento da condutância incremental (32C) caraterísticas de operação	62
Figura 3.20 - Diagrama Lógico Simplificado de um Elemento de Condutância Incremental (32C)	63
Figura 4.1 - Configuração da Bobine de Petersen limitando a corrente de defeito a 40 A	66
Figura 4.2 – Rede de estudo com os pontos em análise.....	67
Figura 4.3 - Rede em defeito com o percurso da corrente de defeito.....	68
Figura 4.4 – Valores das tensões para defeitos francos.....	71

Figura 4.5 - Valores das Tensões para defeitos resistivos (10 Ohms)	75
Figura 4.6 - Valores das tensões para defeitos resistivos (100 Ohms).....	77
Figura 4.7 – Valores das tensões para defeitos resistivos (500 Ohms).....	80
Figura 4.8 – Valores das tensões para defeitos resistivos (1000 Ohms).....	82

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Diferenças entre os regimes de neutro	9
Tabela 2.2 - Regimes de Neutro no Mundo	13
Tabela 2.3 - Resumo das vantagens e desvantagens dos regimes de neutro.....	14
Tabela 3.1 – Intervalo de impedância da bobine de Petersen.....	46
Tabela 3.2 – Valores admissíveis para a corrente de neutro	46
Tabela 4.1 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 40 A	69
Tabela 4.2 - Valores de corrente para bobine de Petersen limitado a 40 A	69
Tabela 4.3 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 20 A	69
Tabela 4.4 - Valores de corrente para bobine de Petersen limitado a 20 A	69
Tabela 4.5 - Valores de tensão com a reatância de neutro	70
Tabela 4.6 - Valores da corrente de defeito com a reatância de neutro	70
Tabela 4.7 - Valores de tensão com o neutro isolado.....	70
Tabela 4.8 - Valores da corrente de defeito com o neutro isolado	70
Tabela 4.9 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 40 A	72
Tabela 4.10 - Valores da corrente de defeito para bobine de Petersen limitado a 40 A.....	73
Tabela 4.11 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 20 A	73
Tabela 4.12 - Valores da corrente de defeito para bobine de Petersen limitado a 20 A.....	73
Tabela 4.13 - Valores de tensão com a reatância de neutro	73
Tabela 4.14 - Valores da corrente de defeito com a reatância de neutro	74
Tabela 4.15 - Valores de tensão com o neutro isolado.....	74
Tabela 4.16 - Valores da corrente de defeito com o neutro isolado	74
Tabela 4.17 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 40 A	75
Tabela 4.18 - Valores de corrente para bobine de Petersen limitado a 40 A	75
Tabela 4.19 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 20 A	76
Tabela 4.20 - Valores de corrente para bobine de Petersen limitado a 20 A	76
Tabela 4.21 - Valores de tensão com a reatância de neutro	76
Tabela 4.22 - Valores da corrente de defeito com a reatância de neutro	76
Tabela 4.23 - Valores de tensão com o neutro isolado.....	77
Tabela 4.24 - Valores da corrente de defeito com o neutro isolado	77
Tabela 4.25 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 40 A	78
Tabela 4.26 - Valores de corrente para bobine de Petersen limitado a 40 A	78
Tabela 4.27 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 20 A	78
Tabela 4.28 - Valores de corrente para bobine de Petersen limitado a 20 A	78
Tabela 4.29 - Valores de tensão com a reatância de neutro	79
Tabela 4.30 - Valores da corrente de defeito com a reatância de neutro	79
Tabela 4.31 - Valores de tensão com o neutro isolado.....	79
Tabela 4.32 - Valores da corrente de defeito com o neutro isolado	79
Tabela 4.33 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 40 A	80
Tabela 4.34 - Valores de corrente para bobine de Petersen limitado a 40 A	80
Tabela 4.35 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 20 A	81
Tabela 4.36 - Valores de corrente para bobine de Petersen limitado a 20 A	81
Tabela 4.37 - Valores de tensão com a reatância de neutro	81
Tabela 4.38 - Valores da corrente de defeito com a reatância de neutro	81

Tabela 4.39 - Valores de tensão com o neutro isolado.....	82
Tabela 4.40 - Valores da corrente de defeito com o neutro isolado	82

ABREVIATURAS

A	-	Ampere
ANSI	-	American National Standards Institute
AT	-	Alta Tensão
BT	-	Baixa Tensão
CAIDI	-	Costumer Average Interruption Duration Index
EDF	-	Eletricidade de França
EDP	-	Energias de Portugal
ERSE	-	Entidade Reguladora Dos Serviços Energéticos
DGEG	-	Direção Geral de Energia Geologia
DMIC	-	Índice de Duração Média de Interrupção no Cliente
DMIS	-	Índice de Duração Média de Interrupção do Sistema
IDMT	-	Tempo Mínimo Inverso Definido
kV	-	Quilovolt
MT	-	Média Tensão
PT's	-	Postos de Transformação
PURN	-	Programa de Uniformização de Regimes de Neutro
RND	-	Rede Nacional de Distribuição
RQS	-	Regulamento da Qualidade de Serviço
SAIDI	-	System Average Interruption Duration Index
SEN	-	Sistema Elétrico Nacional
TI	-	Transformadores de Intensidade
TT	-	Transformadores de Tensão

SIMBOLOGIA

%	-	Porcentagem
Ω	-	Ohm
$3I_0$	-	Corrente homopolar
C	-	Capacidade da fase em relação à terra
I_1	-	Corrente da fase 1
I_2	-	Corrente da fase 2
I_3	-	Corrente da fase 3
I_c	-	Corrente capacitiva
I_d	-	Corrente de defeito
I_{k1}	-	Corrente de curto-circuito (Fase – Terra)
I_L	-	Corrente no ponto de neutro
ILN	-	Circulação de corrente no neutro na reatância de neutro
I_n	-	Corrente nominal
IN	-	Circulação da corrente no neutro ligado diretamente à terra
I_0	-	Corrente homopolar
IR	-	Corrente resistiva
IRN	-	Circulação de corrente no neutro na resistência de neutro
I_{rsdA}	-	Corrente residual A
I_{rsdB}	-	Corrente residual B
L1	-	Fase 1 do sistema
L2	-	Fase 2 do sistema
L3	-	Fase 3 do sistema
LN	-	Reatância de neutro
N	-	Condutor de Neutro
R	-	Resistência
RN	-	Resistência de Neutro
U_N	-	Tensão Nominal

V	-	Tensão simples
V_0	-	Tensão residual
V_0	-	Tensão homopolar
X	-	Reatância
Z	-	Impedância
Z_N	-	Impedância entre o ponto neutro e a terra

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

A energia elétrica tem uma importância decisiva como fator de desenvolvimento e melhoria da qualidade de vida das populações, mas as atividades inerentes à sua produção e distribuição podem ter efeitos ambientais menos positivos.

Em Portugal, a EDP distribuição do grupo EDP opera na atividade de distribuição de eletricidade.

As redes de distribuição são constituídas por linhas aéreas e cabos subterrâneos AT (60 kV), MT (30 kV, 15 kV e 10 kV) e ainda em BT (400/230 V), por subestações, postos de transformação e os demais equipamentos necessários para a sua exploração. A iluminação pública é incluída nas redes de distribuição (E.D.P, 2012).

A liberalização no setor de energia, implicou a adaptação da empresa às novas condições do mercado, assim impôs como principal objetivo aumentar o grau de satisfação dos clientes e a sua fidelização, privilegiando o aumento da qualidade de serviço prestado. Assim sendo, a escolha do regime de neutro pode influenciar bastante este indicador.

A produção de eletricidade nos grandes centros produtores não é por si só suficiente sendo necessário criar infraestruturas para transportar a energia elétrica até ao consumidor final. A distância geográfica entre os centros produtores e os consumidores finais, a irregularidade das cargas e a impossibilidade de armazenar energia elétrica tornou evidente a necessidade de criar uma rede com a capacidade de transmissão a longas distâncias (Puret, 1992).

Os sistemas elétricos em MT abastecem as subestações que vão fornecer os consumidores finais. Estas redes são normalmente emalhadas, mas são operadas em estrutura radial. Esta estrutura é realmente favorável em condições normais de operação visto que permite uma rápida localização de defeitos. A topologia radial pode ser alcançada através da abertura de um conjunto de interruptores-seccionadores localizados em partes estratégicas da rede. As novas tecnologias de automação, permitem o uso de interruptores-seccionadores, bem como o de outros aparelhos telecomandados à distância a partir dos centros de condução. Desta forma

as empresas de distribuição são capazes de alterar o *layout* das redes MT através de reconfigurações periódicas (Zizzo, 2010).

O regime de neutro, ou a ligação intencional da fase ou do neutro à terra, tem como objetivo controlar a tensão para a terra, dentro de limites aceitáveis. Também fornece um fluxo de corrente que irá permitir a deteção de uma ligação indesejada entre os condutores do sistema e a terra, ou seja, um defeito à terra. A origem desta ligação indesejada é geralmente resultado de quebras de isolamento. A energia libertada num defeito à terra pode conduzir a um processo de interrupções, avarias em equipamentos, incêndios e riscos de explosão (Cochran, 2012).

O regime de neutro usado na operação das redes de distribuição desempenha um papel muito importante porque as instalações elétricas requerem um método de ligação à terra apropriado (Zamora, 2004). A seleção do regime de neutro influencia o comportamento do sistema de distribuição no decorrer de um defeito, sendo o regime de neutro adotado como um dos sistemas de proteção. O objetivo principal é o de assegurar a segurança de pessoas e bens e garantir uma elevada continuidade de serviço, com o objetivo de conseguir índices de qualidade de serviço aceitáveis, diminuir as avarias e choques térmicos dos equipamentos, reduzir as interferências nos sistemas de comunicação. Este regime possibilita, ainda, a rápida deteção e eliminação de defeitos ((Roberts, 2001); (Zamora, 2004)).

1.2 Objetivos do Trabalho

Esta dissertação surge do interesse da E.D.P perceber o modo de funcionamento do regime de neutro usando a bobine de Petersen, de avaliar sistemas de proteção e deteção de defeitos aplicando este regime de neutro às novas subestações em Portugal continental. Pretende-se, ainda, estudar os diversos regimes de neutro, analisando as diferenças entre eles.

Sintetizam-se, agora, os objetivos da dissertação:

- Identificação das opções de regimes de neutro existente e suas vantagens e desvantagens;
- Análise da situação existente na rede portuguesa;
- Estudo da introdução ao regime de neutro usando a bobine de Petersen na rede portuguesa: vantagens e constrangimentos, caracterização técnica das bobines, dos sistemas de proteção e deteção de defeitos;
- Caso de estudo de uma rede usando o software DPLAN.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação é composta por 5 capítulos. No 1º capítulo é feita uma breve introdução ao SEN, aos regimes de neutro e é descrita a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 são discutidos os vários regimes de neutro existentes para redes de distribuição em média tensão analisando as vantagens e desvantagens, as diversas configurações existentes e os sistemas de proteção associado a cada regime.

O capítulo 3 é dedicado em especial a um regime de neutro, o neutro ressonante. É feita uma análise pormenorizada a este regime, e são ainda abordados os sistemas de proteção e os métodos de deteção de defeitos a ele associados. Tal como o regime de neutro utilizado em Portugal e quais as tendências para o futuro.

O 4º capítulo diz respeito a um caso de estudo que serve de apoio para o desenvolvimento desta dissertação. Foi estudado o impacto dos diversos regimes de neutro em caso de defeitos francos e resistivos relativamente ao valor da tensão na fase de defeito, nas fases sãs e a corrente de defeito.

Por fim, no capítulo 5 serão descritas as conclusões gerais desta dissertação com sugestões de potenciais trabalhos a realizar no futuro.

Capítulo 2

Regimes de neutro

2.1 Introdução

Quando se fala dos regimes de neutro há, necessariamente, que abordar as suas vantagens e desvantagens que lhes são inerentes. Deve existir um compromisso de forma a que o regime de neutro adotado assegure a segurança de pessoas e bens, mantenha a qualidade de serviço em índices satisfatórios evitando sanções económicas para a empresa fornecedora do serviço. O regime de neutro implementado nas subestações de distribuição de energia elétrica é que determina as características dos defeitos à terra (Clement, 1993).

Em qualquer sistema trifásico existem três tensões que se podem medir entre cada fase e um ponto comum, denominado “Ponto de Neutro”. O neutro é normalmente o ponto onde estão ligadas as três fases do sistema (Figura 2.1) (Prévé, 2006).

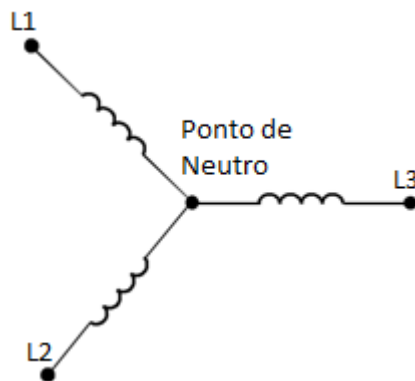


Figura 2.1 - Ponto de Neutro de um Sistema Trifásico ligado em Estrela

O neutro pode ou não estar acessível ou distribuído. O regime de neutro em subestações AT/MT, e a escolha se o condutor de neutro é ou não distribuído (distinção entre 3 ou 4 condutores) tem influência direta num vasto conjunto de parâmetros da rede. Em alguns países o neutro em MT não é distribuído, como acontece em Portugal, contudo o neutro em BT é normalmente distribuído. Em instalações elétricas o neutro pode ser ligado à terra ou não. É por esta razão que se fala sobre os regimes de neutro. O neutro pode ser ligado diretamente à terra ou através de uma resistência/reatância. No primeiro caso dizemos que o neutro é ligado

diretamente à terra e no segundo caso é ligado através de uma impedância. Pode, ainda, tratar-se de neutro isolado quando não existe nenhuma ligação física entre o neutro e a terra.

Em redes de distribuição, o regime de neutro desempenha um papel muito importante. Quando ocorre uma falha no isolamento ou uma fase entra acidentalmente em contacto com a terra, os valores das correntes de defeito que podem ser produzidas, as tensões de contacto e as sobretensões estão estreitamente relacionados com o regime de neutro adotado. O neutro ligado diretamente à terra limita fortemente as sobretensões mas causa correntes de defeito muito elevadas, ao invés no regime de neutro isolado as correntes de defeitos são mais baixas mas favorecem sobretensões elevadas.

Em qualquer instalação, a continuidade de serviço no caso de um defeito de isolamento está diretamente relacionado com o regime de neutro. O neutro isolado permite continuidade de serviço durante um defeito, contrariamente o neutro ligado diretamente à terra ou o neutro ligado à terra através de uma baixa impedância origina disparo ao primeiro defeito. A extensão de prejuízos de alguns equipamentos, tais como motores e geradores quando expostos a um defeito também depende do regime de neutro adotado (Prévé, 2006).

Há alguns objetivos básicos a considerar na escolha do regime de neutro para um qualquer sistema. São eles ((Cochran, 2012); (IEEE, 2000)):

- As tensões nominais e o grau de proteção contra descargas atmosféricas;
- Limitação de sobretensões;
- Seletividade e sensibilidade dos defeitos à terra;
- Limitar a corrente de defeito à terra;
- Segurança das pessoas e animais;
- Redução na frequência de defeitos;
- Redução da manutenção quer em custos e tempo;
- Facilidade na deteção dos defeitos à terra.

A topologia de uma rede elétrica é caracterizada por todas as fases que envolvem a atividade da energia elétrica na distribuição pública (Layout, proteção e operação). Na prática, para o distribuidor, definir a topologia, significa assumir alguns fatores físicos e simultaneamente ter em consideração os objetivos traçados e alguns

condicionalismos técnicos (Puret, 1992). A escolha da topologia depende dos seguintes objetivos:

- Garantir a segurança de pessoas e bens;
- Atingir um nível pré-definido para a qualidade de serviço;
- Produzir a rentabilidade esperada.

A escolha do regime de terra define, entre outras coisas, as sobretensões e as sobreintensidades de defeito à terra que podem ser encontrados na rede. Estes dois parâmetros são contraditórios, uma vez que para obter valores baixos de corrente de defeito, conduz a valores elevados de tensão e vice-versa. Estes valores colocam restrições elétricas que o equipamento tem de suportar, contudo optar por uma determinada configuração da rede, podemos simultaneamente escolher as diversas proteções existentes para aquela configuração e modo de operação (Puret, 1992).

As redes públicas de distribuição, em MT, são construídas com base em dois parâmetros fundamentais que influenciam a maioria dos componentes bem como o seu funcionamento. Estes parâmetros são o regime de neutro e a tensão de funcionamento. A escolha destes dois parâmetros tem um impacto muito importante em toda a rede de distribuição, e é muito difícil, senão mesmo impossível ou economicamente não viável alterá-los posteriormente. Por isso é essencial compreender perfeitamente a influência destas decisões noutros parâmetros da rede, tais como os sistemas de proteções, a segurança, os defeitos, entre outros (Fulchiron, 2001)).

O valor da corrente de defeito à terra, no caso de o defeito ser entre fase-terra, é determinado principalmente pela impedância do regime de neutro e pelas capacidades entre as fases condutoras e a terra, presentes na rede de distribuição.

A tensão de contacto e de passo são dois aspetos que dizem respeito à segurança das pessoas na proximidade do defeito elétrico. Estes valores de tensões estão diretamente relacionados com o valor das correntes de defeito e as impedâncias por onde a corrente de defeito circula.

No nível de sobretensões, o regime de neutro tem um efeito na frequência de sobretensões em ambiente industrial quando ocorrem defeitos, também na amplitude e amortecimento de fenómenos oscilatórios ou transitórios.

Relativamente ao nível das perturbações nas redes vizinhas, em caso de redes aéreas, a corrente de defeito origina um forte campo magnético. São induzidas tensões nas redes vizinhas, redes de telecomunicações, redes cabladas (Cabos com Cobre). O nível de tensão pode ser considerado inaceitável se colocar em risco a

operação normal ou até o isolamento dos equipamentos vizinhos. Antes da instalação de novas linhas MT, devem ser realizados estudos de compatibilidade eletromagnética (Fulchiron, 2001).

2.1.1 Impacto nas características de operação

Um vasto conjunto de critérios de operação é afetado, também, pelo regime de neutro (Fulchiron, 2001):

- A duração permitida em cada defeito à terra (extensão do perigo e segurança);
- O comportamento da formação dos arcos em ambiente externo (se é auto-extinguível ou não);
- Os métodos usados para localizar os defeitos na rede;
- As flutuações nas tensões na extremidade das cargas durante o defeito;
- O número e a duração dos defeitos sentidos pelos clientes;
- A possibilidade e a facilidade de reconfiguração da rede depois de um incidente.

2.1.2 Impacto nas especificações construtivas da rede

O regime de neutro tem uma importante influência nos aspetos construtivos das redes (Fulchiron, 2001):

- Os valores das impedâncias de ligação à terra têm de ser adaptadas à corrente de defeito;
- Os condutores afetados pelos defeitos devem possuir uma adequada resistência térmica;
- O isolamento dos condutores e dos equipamentos deve ter em consideração as sobretensões influenciadas pelo regime de neutro.

A possibilidade de defeitos à terra é sempre uma questão pertinente, uma vez que os defeitos que afetam várias fases não são influenciados pelo regime de neutro existente.

A Tabela 2.1 contém uma lista significativa dos efeitos gerados pela escolha inicial dos regimes de neutro e mostra vários fatores diretamente relacionados com os valores da corrente de defeito ((Fulchiron, 2001); (Roberts, 2001)). O mesmo se aplica

à segurança das pessoas (tensão de passo e de contacto), cavas de tensão, compatibilidade eletromagnética com os circuitos vizinhos (redes de telecomunicações) e avarias no local do defeito. Estes factos vêm confirmar que não existe um regime de neutro perfeito já que as vantagens e desvantagens estão distribuídas pelos diversos regimes (Fulchiron, 2001).

Tabela 2.1 – Diferenças entre os regimes de neutro

Regime de Neutro	Isolado	Bobine de Petersen	Impedante	Ligado Diretamente à terra
Corrente do defeito	Relacionado com a Capacitância: 2 a 200 A	Quase nulo, depende da afinação e fator da qualidade (< 40 A)	Dependendo da impedância: 100 A a 2000 A	Elevado: 2 a 25 kA, varia com o local
Perigosidade	Baixo	Quase nula	Depende da impedância	Elevada
Restrições	Algumas sobretensões	Calor na bobine	Calor na impedância	Térmicas e eletrodinâmicas
Sistema de proteções	Difícil	Complexa	Fácil (Tempo)	Fácil (Corrente)
Nível de isolamento necessário	Fase - Fase	Fase - Fase	Fase - Fase ¹ Fase - Neutro ²	Fase - Neutro

A importância relativa destas vantagens varia consoante a rede em questão seja constituída por linhas aéreas ou com cabos subterrâneos, varia o comprimento da rede, entre outros fatores. Uma decisão bem pensada pode ser prudente para o futuro, uma vez que a rede com os anos tende a evoluir e podem ser necessárias novas alterações.

2.2 Regimes de neutro

As redes podem ser classificadas em duas grandes categorias (Fulchiron, 2001):

- Redes com o neutro distribuído (4 condutores).
- Redes com o neutro não distribuído (3 condutores).

¹ Usando uma resistência de neutro

² Usando reatância de neutro

Em teoria, cada uma destas duas categorias pode usar diferentes regimes de neutro com vários valores de impedâncias. De facto, todas as redes com 4 condutores usam o regime de neutro ligado diretamente à terra. O condutor de neutro pode ser ligado diretamente à terra através de vários pontos na rede e desta forma nunca apresenta tensões perigosas. Esta configuração é usada nos Estados Unidos, com maior predominância no norte da América, mas também em certas regiões do sul da América, Austrália e alguns países influenciados pelos Estados Unidos da América.

Redes com 3 condutores usam 4 tipos de regimes de terras (Fulchiron, 2001):

- Neutro ligado diretamente à terra (Grã-Bretanha, Espanha, entre outros)
- Neutro impedante (França, Alemanha, Espanha, Portugal, entre outros)
- Bobine de Peterson (Alemanha, Hungria, Polónia, entre outros)
- Neutro isolado (Espanha, Suécia, Noruega, Itália, China, entre outros)

Estas escolhas são feitas com base nas características do local de implementação, nomeadamente com a tipologia da rede, que pode ser aérea ou subterrânea. As alterações do regime de neutro são possíveis, mas acarretam enormes encargos financeiros, sobretudo no que diz respeito à mudança de equipamentos e aos recursos humanos utilizados.

2.2.1 Sistemas com 3 condutores

Neste sistema, o condutor neutro não é distribuído e assim sendo não está disponível para os utilizadores. As cargas, mesmo sendo monofásicas só podem ser ligadas às fases da rede. Esta solução não gera qualquer corrente no condutor de neutro, excluindo qualquer desequilíbrio capacitivo nas fases condutoras, que num sistema com estas características é zero. Em redes com o neutro não distribuído, as cargas são obrigatoriamente colocadas entre as fases e quando existe a ligação do neutro, não circula nenhuma corrente através dele. Esta situação é puramente teórica uma vez que correntes capacitivas que existem entre as fases condutoras e a terra nunca estão perfeitamente equilibradas. Este desequilíbrio é devido à diferente geometria nas linhas aéreas, ao interior dos transformadores, entre outros fatores. Contudo, quando a rede é construída, o distribuidor tem em conta a troca dos condutores ao longo de cada alimentador, a contínua corrente residual de cada fonte de alimentação pode ser reduzida em menos de 1 A, ou até menos quando se usa o neutro isolado. Este tipo de corrente residual natural pode ser usada para encontrar a

presença de baixos valores de correntes provenientes de defeitos vindos das subestações (Fulchiron, 2001).

O ponto de neutro da rede, continua disponível exclusivamente para o distribuidor, podendo ser ligado uma impedância de qualquer valor ou tipo. Na prática são usados 4 regimes de neutros, o isolado, bobine de Petersen, impedante ou o ligado diretamente à terra. Se o valor da impedância do regime de neutro é significativo comparado com a impedância da rede, a impedância homopolar resultante determina o valor máximo da corrente de curto-circuito à terra.

Para o cálculo da impedância homopolar da rede, a impedância de neutro deverá ser considerada como estando em paralelo com as capacidades fase-terra da rede. Estas capacidades podem tomar valores elevados, o que contribuirá significativamente para o valor da corrente de curto-circuito fase-terra. No entanto, como não existe corrente residual durante a exploração normal da rede, os curto-circuitos fase-terra podem ser detetados na subestação.

Dependendo da impedância de neutro, a proteção adotada pode variar, mas não existe a obrigação técnica de usar dispositivos de proteção descentralizada. O sistema de proteção pode permanecer simples, com a vantagem que não requer alterações se for alterada a estrutura da rede (Fulchiron, 2001).

2.2.2 Sistemas com 4 condutores

Sistemas com 4 condutores são caracterizados pela distribuição do condutor de neutro. Esta configuração é usada nos Estados Unidos da América e alguns países influenciados pela América do Norte e sujeitos à regulamentação do Instituto Nacional de Estandarização Americana (ANSI). A distribuição do condutor de neutro permite que as cargas monofásicas sejam alimentadas, entre a fase e o neutro. Em condições normais de operação, a utilização de uma fase, não é totalmente controlada pelo distribuidor, o que resulta na presença de uma corrente no condutor de neutro ou na terra. Devido à ligação direta à terra, a corrente de defeito é limitada principalmente pela impedância da rede, distância entre o transformador AT/MT e a localização do defeito. Esta situação exige o uso de uma proteção “descentralizada”, que seja capaz de identificar pequenos intervalos de corrente conforme aumenta a distância, e que seja coordenada ao mesmo tempo. O sistema de proteções resultante é complexo e inadequado para a reconfiguração da rede em caso de um incidente (Fulchiron, 2001).

A escolha do regime de neutro para sistemas elétricos tem sido tópico de uma acesa controvérsia devido ao facto de ser impossível encontrar um compromisso para os diversos regimes. A experiência adquirida permite fazer uma escolha mais correta

de acordo com as restrições técnicas de cada sistema de neutro. Este capítulo compara os diferentes regimes de neutro, distinguindo-se pela ligação do ponto de neutro e a técnica de funcionamento usada [Schneider-2008].

Não existe um regime de neutro normalizado, isto significa que cada país, empresa fornecedora do serviço, usa o regime de neutro que considera mais vantajoso. É possível encontrar pelo mundo todo os diversos regimes de neutro adotados (Puret, 1992):

- Neutro isolado
- Neutro ligado diretamente à terra
 - Neutro distribuído
 - Neutro não distribuído
- Neutro ligado à terra por impedância
- Neutro ressonante

A escolha do regime de neutro adotado depende (Clement, 1993):

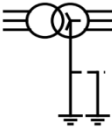
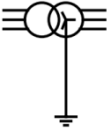
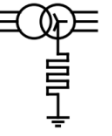
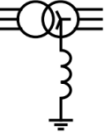
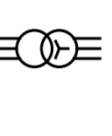
- Das características do sistema de média tensão:
 - ❖ Nível de Tensão
 - ❖ Sistema subterrâneo ou aéreo
 - ❖ Comprimento da rede
 - ❖ Número e a topologia dos defeitos que afetam o sistema
 - ❖ Resistividade do solo
- Dos objetivos para a sua utilização:
 - ❖ Valores de sobretensões admissíveis que garantam a coordenação do isolamento dos equipamentos e a segurança das pessoas
 - ❖ Padrão de fornecimento
 - ❖ Limitação dos fenómenos de indução aos sistemas vizinhos
- Legislação em vigor.
- Comparação entre os custos dos diferentes métodos e seus graus de eficiência.

Como já foi referido, nenhum destes regimes é usado predominantemente pelo mundo, alguns são específicos de alguns países, no entanto podem ser usados mais que um regime de neutro dentro do mesmo país ou até mesmo pela empresa distribuidora de eletricidade (Tabela 2.2) ((Puret, 1992); (Roberts, 2001)). No entanto,

REGIMES DE NEUTRO

a escolha do regime de neutro tem sempre em consideração os custos da instalação e de operação.

Tabela 2.2 - Regimes de Neutro no Mundo

					
Regime de Neutro	Neutro ligado à terra (Neutro distribuído)	Neutro ligado à terra (Neutro não distribuído)	Neutro ligado à terra por impedância	Neutro ressonante	Neutro Isolado
Países	Austrália	X			
	Canada	X			
	Espanha		X	X	X
	França		X		
	Japão				X
	Estados Unidos	X			
	Itália				X
	Alemanha		X	X	
	Irlanda				X
	Grã-Bretanha		X		
	América Latina	X			
	China			X	
	Perú				X
	Rússia				X
	Portugal		X		
	Israel			X	

A escolha do regime de neutro influencia o desempenho da rede de distribuição e a escolha das proteções a utilizar. As principais diferenças entre os diversos regimes de neutro estão relacionadas com o comportamento da rede em caso de um defeito à terra (Puret, 1992).

Estas diferenças traduzem-se em termos reais para ((Puret, 1992)):

- A facilidade na deteção de defeitos;
- A segurança para as pessoas e bens;
- Os impactos nos equipamentos eletrotécnicos.

2.2.3 Vantagens e desvantagens dos diversos Regimes de Neutro

Tabela 2.3 - Resumo das vantagens e desvantagens dos regimes de neutro

Regime de neutro	Vantagens	Desvantagens
Neutro ligado diretamente à terra (Neutro distribuído)	<ul style="list-style-type: none"> Alimentação monofásica e trifásica 	<ul style="list-style-type: none"> Elevada qualidade nos eletrodos de terra utilizados Sistema complexo de proteções Elevados valores de corrente de defeito
Neutro ligado diretamente à terra (Neutro não distribuído)	<ul style="list-style-type: none"> Fácil deteção de defeitos 	<ul style="list-style-type: none"> Elevados valores de corrente de defeito
Reatância de Neutro	<ul style="list-style-type: none"> Limitação das sobretensões Limita a corrente de defeito 	<ul style="list-style-type: none"> Impossível operação da rede em caso de defeito Não permite a autoextinção de correntes de defeito
Neutro Impedante		
✓ (Comparado com o neutro ligado à terra)	<ul style="list-style-type: none"> Limita a corrente de defeito 	<ul style="list-style-type: none"> Sistema mais complexo de proteções
✓ (Comparado com o neutro isolado)	<ul style="list-style-type: none"> Reduz sobretensões 	<ul style="list-style-type: none"> Valores superiores de corrente de defeito
Neutro Ressonante	<ul style="list-style-type: none"> Autoextinção de correntes de defeito 	<ul style="list-style-type: none"> Sistema complexo de proteções
Neutro Isolado	<ul style="list-style-type: none"> Limita a corrente de defeito 	<ul style="list-style-type: none"> Elevadas sobretensões

Existe um vasto conjunto de regimes de neutro que se podem aplicar nas redes de distribuição de média tensão por todo o mundo. Desde o neutro ligado diretamente à terra com o neutro não distribuído (Reino Unido), neutro ligado diretamente à terra mas no qual o neutro se encontra distribuído (Estados Unidos e Canadá), neutro isolado (Itália, Japão e Irlanda), neutro impedante (França e Espanha) ou neutro ressonante (Alemanha, Escandinávia, França) (Griffel, 1997).

Antigamente, as grandes empresas faziam as suas escolhas iniciais baseando-se apenas em aspetos económicos e técnicos, deixando para segundo plano questões como a segurança e a qualidade no fornecimento de energia elétrica, enquanto que agora estas são de extrema relevância. A implementação do regime de neutro depende das características físicas da rede de média tensão (comprimento da

rede, rede aérea/subterrânea), da densidade e tipos de carga a alimentar e da qualidade dos elétrodos de terra (Griffel, 1997).

Como já foi visto, existe uma vasta panóplia de regimes de neutro que podem ser utilizados, sendo que cada um apresenta vantagens e desvantagens, e custos diferentes consoante a solução adotada.

2.2.4 Ligações do Regime de Neutro

O condutor de neutro pode ser ligado à terra através de 5 maneiras diferentes, de acordo com o tipo (Capacitivo, resistivo ou indutivo) e com valor (0 até ∞) da impedância Z_N a utilizar na ligação entre o neutro e a terra (Figura 2.2) [Schneider-2008].

Z_N é ∞ , Neutro Isolado, não existe ligação à terra.

Z_N está relacionado com a resistência com um valor bastante elevado.

Z_N está relacionado com a reatância, normalmente com um valor baixo.

Z_N está relacionado com a bobine de compensação (Bobine de Petersen), designado para compensar sistemas capacitivos.

Z_N é 0, o neutro é ligado diretamente à terra.

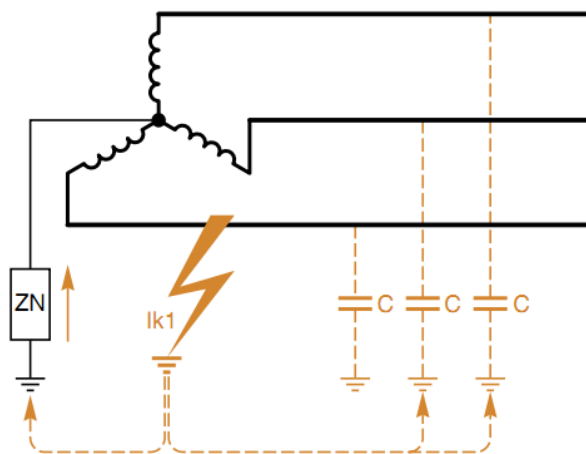


Figura 2.2 - Circuito equivalente de defeito à terra

2.2.5 Dificuldades e critérios de seleção

São vários os critérios de seleção a considerar, nomeadamente [Schneider-2008]:

- Considerações técnicas (Funcionamento do sistema de potência, sobretensões, correntes de defeito);

- Considerações operacionais (continuidade de serviço, manutenção);
- Custos (Investimentos e despesas operacionais);
- Local e métodos usados.

As sobretensões excessivas são originadas na ocorrência de um defeito, sendo um problema que pode causar a rutura dielétrica do material isolador, causando curto-circuitos e podem ter diversas origens, nomeadamente [Schneider-2008]:

- Descargas atmosféricas a que todos os equipamentos exteriores estão sujeitos;
- Sobretensões de origem interna causadas por comutações e situações críticas, como situações de ressonância;
- Sobretensões resultantes de defeitos à terra e a sua eliminação.

O principal objetivo dos sistemas de proteções é evitar que os valores elevados da corrente de defeito sejam atenuados o mais rápido possível. A corrente é normalmente muito elevada e produz uma série de consequências relacionadas com os seguintes aspetos [Schneider-2008].

- Danos causados por arco elétrico no ponto de defeito, nomeadamente a fusão de componentes em máquinas elétricas rotativas;
- Limite térmico da proteção do cabo;
- Tamanho e custo da resistência de terra;
- Indução em circuitos adjacentes de telecomunicações;
- Perigo para as pessoas, originado pelo potencial aumento de exposição às partes condutoras.

Infelizmente, otimizar um destes requisitos implica, automaticamente, a desvantagem de outro. Tipicamente dois tipos de regimes de neutro acentuam este contraste:

- Neutro isolado, elimina o fluxo da corrente de defeito à terra através do neutro mas origina sobretensões elevadas.
- Neutro ligado diretamente à terra, que reduz ao mínimo as sobretensões, mas em contrapartida origina elevados valores de corrente.

Para as considerações operacionais, de acordo com o regime de neutro adotado:

- Operação da rede pode ou não ser possível após uma falha que tenha ocorrido;
- As tensões de contacto são diferentes;
- A seletividade das proteções podem ser fácil ou difícil implementação.

2.2.6 Neutro isolado e sistema de proteção

Diz-se que uma rede tem o regime de neutro isolado quando não existe qualquer tipo de ligação física entre o ponto de neutro do transformador MT e a terra (Figura 2.3) [Schneider-2008]. A tensão média da rede em relação com a terra é então fixada pela impedância entre condutores e a terra. Esta impedância inclui a capacidade das linhas e dos cabos, a qual é predominante, mas também as impedâncias de fuga dos diversos componentes (descarregadores de sobretensões, sensores, entre outros) e as dos defeitos (Fulchiron, 2001). A tensão residual, que é a soma vetorial da tensão composta das 3 fases, nunca é na totalidade nula. Fazer a monitorização desta tensão pode ser uma ótima solução, o que nos indica a qualidade do isolamento, desde que qualquer defeito entre a fase e a terra cause um forte desequilíbrio entre a impedância e o aumento da tensão residual. No entanto, esta informação é comum a toda a rede, não significando que seja possível detetar o defeito (Fulchiron, 2001).

Este regime é usado principalmente em linhas aéreas e pouco extensas. Para sistemas com grandes distâncias, a capacidade das linhas à terra é de tal forma elevada, que faz com que a corrente se eleve de tal forma que origina uma situação extremamente perigosa. A rede tem ser isolada entre as fases e a terra devido à tensão entre as linhas (Griffel, 1997).

A corrente de defeito pode ser demonstrada por $I_{k1} = 3 * C * \omega * V$, onde:

- C é a capacitância entre a fase e a terra
- ω é a frequência angular do sistema definido por $\omega = 2 * \pi * f$
- V é a tensão simples

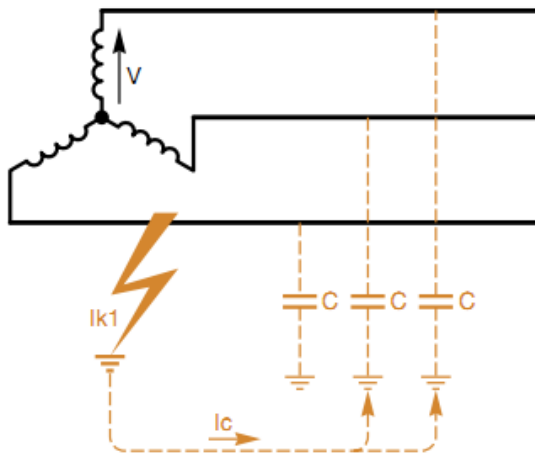


Figura 2.3 - Corrente defeito capacitiva num sistema de neutro isolado

A corrente de defeito pode permanecer por um longo período de tempo, sem causar prejuízos, desde que seja inferior a alguns amperes. Não necessitam de ser tomadas ações para corrigir o primeiro defeito, tornando esta solução vantajosa por manter a continuidade de serviços, porém, isso acarreta as seguintes consequências [Schneider-2008]:

- O isolamento tem de ser monitorizado constantemente e os defeitos que ainda não foram resolvidos devem ser indicados num dispositivo de monitorização de isolamento ou por uma unidade de proteção de deslocamento do ponto de neutro;
- A deteção de defeitos requer equipamento automático bastante complexo para uma identificação rápida da fase em defeito e a permanência de pessoal qualificado para operar com o equipamento;
- Se o primeiro defeito não for eliminado, se ocorrer o segundo defeito numa fase distinta, vai causar um curto-circuito entre as duas fases, a qual será eliminada pelas unidades de proteção.

A principal vantagem é a continuidade de serviço, uma vez que a corrente de defeito é baixa e não é suficiente para provocar o disparo automático das proteções. O disparo, nestas circunstâncias só acontece ao segundo defeito [Schneider-2008].

Quanto às desvantagens, existe a incapacidade para eliminar uma sobretensão transitória através da terra, que pode ser um grande problema se a sobretensão for demasiado elevada. A monitorização do isolamento é obrigatória, com a indicação do primeiro defeito. É necessário ter uma equipa qualificada com o equipamento necessário para a deteção do primeiro defeito. A implementação das proteções para

deteção do primeiro defeito é uma tarefa difícil e existem riscos de sobretensões criadas por ferro-ressonância [Schneider-2008].

A origem do defeito tem de ser detetada por uma unidade direcional de proteção (67N) de defeitos à terra (Figura 2.4). Esta proteção é implementada pela comparação do ângulo de deslocamento entre a tensão residual e a corrente residual, da fase em defeito com as fases saudáveis.

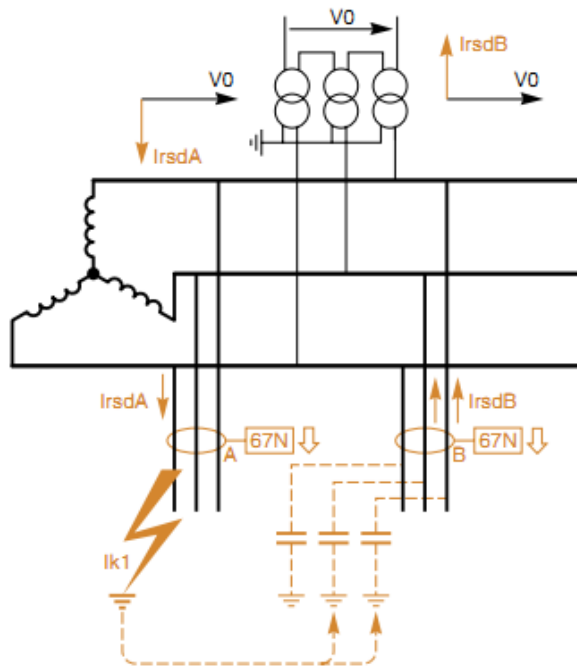


Figura 2.4 - Detecção de um defeito

A corrente é medida por um núcleo toroidal, Transformador de Intensidade (TI) e a atuação das proteções é definida do seguinte modo [Schneider-2008]:

- Evitar disparos intempestivos
- Inferior à soma de todas as correntes capacitivas de todos os outros circuitos

Isto faz com que seja bastante difícil detetar defeitos em sistemas elétricos de pequena dimensão, que têm apenas algumas centenas de metros de comprimento [Schneider-2008]. No caso de um defeito, a tensão entre fase e terra é zero para a fase em questão e nas outras 2 fases a tensão é igual à tensão composta. As correntes presentes nas capacidades entre fase-terra das 3 fases condutoras, não são equilibradas, uma corrente residual diferente de zero, circula pela

rede. A utilização de um dispositivo de proteção contra sobreintensidades não se traduz numa solução simples e eficiente para detetar quais os condutores em defeito.

Redes com o neutro isolado podem ser usadas mesmo com um defeito, defeito este detetado mas não eliminado. Este modo de operação é usado por vezes para melhorar a continuidade de serviço, mas desta forma é impossível localizar o defeito enquanto os clientes estiverem a ser alimentados. O risco associado a operar a rede com um defeito, é o de ocorrer um segundo defeito noutra fase, este segundo defeito cria um curto-circuito que coloca as fases sãs submetidas a tensões compostas (Fulchiron, 2001).

Este regime é usado frequentemente nos sistemas públicos de distribuição do Japão, Espanha e Itália e em ambientes industriais (15 kV) que necessitam de uma elevada continuidade de serviço, neste caso a referência à terra é efetuada pela capacidade da linha. A deteção de defeitos pode não ser uma tarefa fácil e um defeito muito resistivo pode passar despercebido por vários períodos de tempo (Griffel, 1997). Um defeito fase-terra apenas produz uma corrente de baixa intensidade através as capacidades fase-terra das fases sãs [Schneider-2008].

2.2.7 Neutro ligado diretamente à terra

Ligação elétrica entre a terra e o ponto neutro com impedância nula [Schneider-2008].

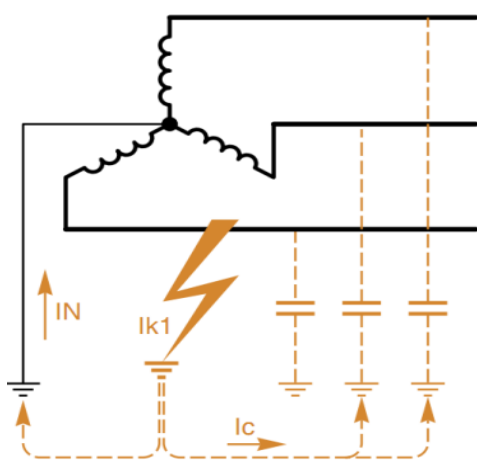


Figura 2.5 – Defeito à terra no regime de neutro ligado diretamente à terra

Este regime de neutro pode ser interpretado como sendo um caso especial de neutro impedante, visto ser ligado à terra através de condutor de impedância praticamente nula. Esta impedância exclusiva da rede (origem e linhas), o defeito e o retorno pela terra fixam a intensidade do defeito. Portanto, na generalidade a

intensidade da corrente da grande maioria dos defeitos pode apresentar variações significantes dependendo do local e do tipo de defeito, e como consequência isso conduz a uma difícil reconfiguração da rede (Fulchiron, 2001).

Neste caso a tensão simples é aplicada ao defeito, o potencial permanece igual ao potencial da terra. Na ocorrência de um defeito é libertada uma grande quantidade de energia (Griffel, 1997).

Desde que o regime de neutro não tenha nenhuma impedância limitadora, a corrente de defeito fase-terra é praticamente um curto-circuito fase-neutro, valor que é demasiado elevado, e o disparo das proteções ocorre ao primeiro defeito de isolamento [Schneider-2008]. Este sistema pode ser implementado de dois modos diferentes, dependendo se o neutro é ou não distribuído (Griffel, 1997).

2.2.7.1 Sem o sistema de limitação do potencial à terra (Neutro não distribuído):

Esta técnica é usada sobretudo no Reino Unido. A ocorrência de um defeito apresenta valores elevados de correntes de defeito, o que facilita os dispositivos de proteção que monitorizam constantemente a corrente nas fases de alimentação. O nível de isolamento requerido é baixo, no entanto a energia libertada no local de defeito é muito elevada. Isto origina uma rápida atuação dos sistemas de proteções o que deixa de assegurar uma boa continuidade de serviço (Griffel, 1997).

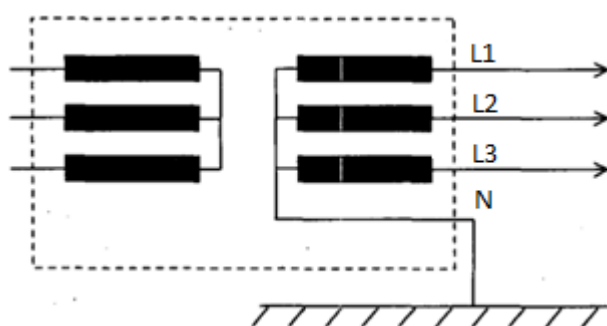


Figura 2.6- Esquema do regime de neutro com o neutro não distribuído

2.2.7.2 Com o sistema de limitação do potencial à terra (Neutro distribuído):

Este tipo de configuração é usado principalmente nos Estados Unidos e Canadá. O neutro está acessível e distribuído por vários pontos. Os defeitos são detetados através da monitorização das correntes nas diversas fases, geralmente através de dispositivos simples. O nível de isolamento da rede é limitado pela linha de

neutro, este regime de neutro permite alimentação de cargas monofásicas (Griffel, 1997).

Quando ocorre um defeito é libertada uma grande quantidade de energia, por isso tem de ser eliminado o mais rápido possível. Se a corrente de defeito não for ligeiramente superior à corrente das cargas, a deteção do defeito torna-se numa tarefa mais difícil. Este problema tem dado origem a soluções inovadoras, como por exemplo a deteção de arcos elétricos e a deteção de defeitos muito resistivos.

Nesta solução é preciso ter especial atenção na colocação dos eletrodos de terra e verificar que todos os eletrodos estão interligados entre si (Griffel, 1997).

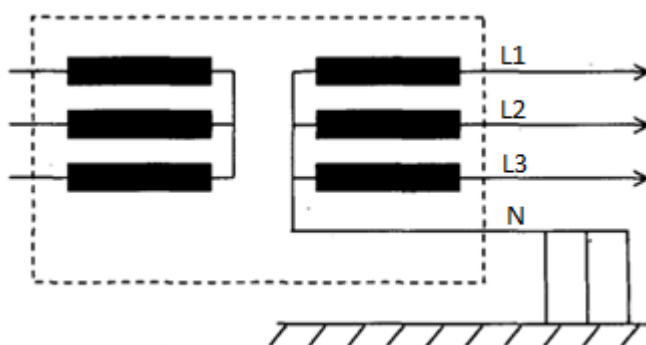


Figura 2.7 - Esquema do regime de neutro com o neutro distribuído

As principais vantagens da utilização deste regime são as sintetizadas de seguida:

- Sistema ideal para a eliminação de sobretensões;
- Equipamento com isolamento dimensionado para a tensão entre fase-neutro (tensões simples) pode ser utilizado;
- Unidades de proteção específicas não são necessárias: as proteções comuns de sobreintensidade de uma fase podem ser usadas para eliminar defeitos [Schneider-2008].

Relativamente às desvantagens podemos enumerar as seguintes:

- Este sistema apresenta todos os inconvenientes e riscos de elevadas correntes de defeitos à terra: perturbações e avarias elevadas do sistema;
- Continuidade de serviço não existe em caso de defeito;
- O perigo para as pessoas é muito elevado durante o defeito, uma vez que as tensões de contacto originadas são elevadas [Schneider-2008].

2.2.7.3 Função de proteção

Os defeitos impedantes são detetados pelo atraso da unidade de proteção de defeitos à terra (ANSI 51N), que calcula ou mede através de 3 TI a corrente residual, definido na gama da corrente nominal (Figura 2.8) [Schneider-2008].

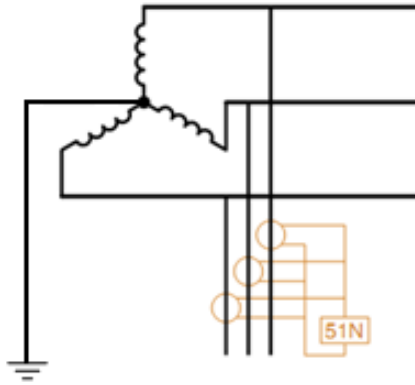


Figura 2.8 - Proteção de defeitos à terra 51N

Através da adoção de detetores com limites o mais baixo possível, concebidos para diagnosticar defeitos à terra é, também, possível detetar defeitos resistivos (Fulchiron, 2001). A deteção de defeitos é muito simples, muitas vezes a mesma proteção pode ser usada em defeitos fase-terra. O funcionamento do detetor de defeitos é muito simples, indicando qual a fase em que se encontra o detetor de sobreintensidade ou possivelmente o detetor de sobreintensidade residual. Neste regime, quando os defeitos são de elevada intensidade, eles podem traduzir-se num perigo acrescido. Por fim, é desejável escolher curtos intervalos de tempo na intervenção das proteções. Esta situação, associada à necessidade sempre presente para a seletividade de uma rede de distribuição, favorece o uso de proteções IDMT (muitas vezes conhecido como proteção de "tempo inverso") (Fulchiron, 2001).

Este regime de neutro não é usado na Europa em sistemas de distribuição aéreos ou subterrâneos MT, mas é o sistema que predomina no norte da América. Nos sistemas norte americanos (linhas aéreas), outras vantagens justificam estas opções [Schneider-2008]:

- Condutor de neutro distribuído
- 3 fases ou 2 fases + neutro ou 1 fase + neutro.
- A utilização do condutor neutro como um condutor de proteção com ligação à terra em cada extremo da rede de distribuição.

Este regime deve ser usado quando a potência de curto-circuito é baixa [Schneider-2008].

2.2.8 Neutro ligado à terra por impedância

Esta técnica consiste em colocar uma impedância, uma resistência, bobine ou reatância entre o neutro e a terra. É usado em países como a Portugal, Espanha e França. Com este regime de neutro consegue-se reduzir a corrente de defeito, estes são ainda detetados de forma segura, precisa e rápida. A rede tem ser isolada entre as fases e a terra devido à tensão entre as fases (Griffel, 1997).

Para esta rede, é inserida uma impedância, normalmente resistiva, na ligação de neutro à terra. Pode incluir também uma parte indutiva, a fim de compensar parcialmente a contribuição capacitiva da rede.

O valor da impedância é sempre alto comparado com a impedância das linhas e, portanto, a corrente de defeito do regime ligado diretamente à terra varia de acordo com o local onde o defeito ocorre, esta corrente é aproximadamente na ordem das centenas de amperes, de 100 A até 2000 A. Este elevado valor da corrente de defeito, assim como a preponderância dos componentes que circulam na impedância de neutro, tornam mais fácil a deteção de defeitos à terra (Fulchiron, 2001):

- O dispositivo de proteção, do tipo “sobreintensidades residuais”, com valores limites suficientemente elevados, não são afetados por fenómenos transitórios ou capacitivos, funcionando corretamente nessas redes;
- A seletividade nas fases condutoras é fácil devido ao valor significativo da corrente de defeito e a seletividade entre os dispositivos de proteção dispostas em cascata é obtido com base no tempo de operação, contudo a existência de defeitos impedantes à terra, que não são insignificantes quando comparado com o neutro impedante torna desejável a procura de outras soluções, contra disparos intempestivos. Para defeitos com elevados valores de impedância, os dispositivos de proteção de corrente residual e dispositivos adicionais, tais como sistemas de deteção automática com controlo sobre várias linhas, são colocados nas subestações.

Em diversas situações, quando a carga está a jusante da proteção, a proteção contra defeitos diretos à terra pode ser realizada por dispositivos de sobreintensidade

em cada fase. Esta é a principal razão porque muitos distribuidores não colocam proteções de corrente residual nestes circuitos. Localizar defeitos nestas redes pode ser fácil pelo simples facto, de poderem ser usados detetores com preços acessíveis, os quais são capazes de detetar defeitos diretos à terra. A sua limitada sensibilidade, significa que certos defeitos com impedância elevada embora diagnosticados pelos dispositivos de proteção da subestação de origem, podem não atuar devido a valores de correntes muito baixos. É possível então escolher parametrizações com valores mais baixos, com o inconveniente de causar sinalizações desnecessários, uma vez que a operação não intencional de um detetor de defeitos geralmente não tem consequências significativas (Fulchiron, 2001).

No regime de neutro ligado à terra através de uma impedância podemos usar os seguintes limitadores de corrente:

2.2.8.1 *Reatância de Neutro e sistema de proteção*

A reatância é colocada entre o ponto de neutro e a terra. Para sistemas de energia com tensões superiores a 40 kV, é melhor usar a reatância do que uma impedância resistiva devido à quantidade de calor que se liberta em caso de defeito à terra (Figura 2.9) [Schneider-2008].

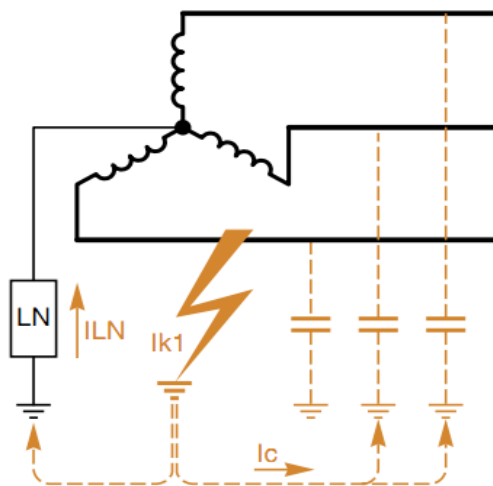


Figura 2.9 - Reatância de neutro com o neutro acessível

Uma impedância indutiva limita a corrente de defeito I_{k1} e favorece a eliminação das sobretensões. Contudo, as proteções têm de atuar automaticamente ao primeiro defeito. Para reduzir as comutações e permitir uma fácil deteção, a corrente que circula na reatância (I_{LN}) tem de ser superior a I_c (corrente capacitiva)

do sistema. Em sistemas de distribuição são usualmente usados valores entre 300 A³ e 1000 A⁴, isto porque são mais fáceis de detetar e permitem a eliminação de sobretensões.

As principais vantagens da utilização deste regime são as sintetizadas de seguida:

- Este sistema limita a amplitude de correntes de defeito;
- As proteções são fáceis de implementar se a limitação da corrente for superior à corrente capacitiva no sistema;
- A bobine possui baixa resistência e não dissipa grande quantidade de energia térmica, assim sendo o tamanho pode ser reduzido;
- Em sistemas de AT, esta solução é mais benéfica que a resistência de terra [Schneider-2008].

Relativamente às desvantagens podemos enumerar as seguintes:

- A continuidade de serviço é degradada, o defeito tem de ser eliminado o mais rápido possível assim que ocorre;
- Quando os defeitos são eliminados, podem ocorrer sobretensões elevadas devido à ressonância que pode ocorrer entre as capacidades e a reatância da rede de distribuição [Schneider-2008].

Se o ponto de neutro está acessível, a reatância é colocada entre o neutro e a terra. Quando o neutro não está acessível, ou quando o sistema de proteções demonstra que é apropriado, deve ser criado um neutro artificial através da reatância ligada ao barramento que consiste numa ligação em ZigZag da reatância com o neutro acessível (Figura 2.10). Em Portugal Continental a rede MT é constituída com reatâncias de neutro em ZigZag.

A impedância entre as duas partes dos enrolamentos é essencialmente indutiva e com baixo valor e limita os valores da corrente de defeito para valores superiores a 100 A. Nos sistemas AT para reduzir a amplitude da corrente de defeito pode ser colocada uma resistência entre a reatância e a terra [Schneider-2008].

³ Linhas aéreas ou mistas

⁴ Linhas subterrâneas

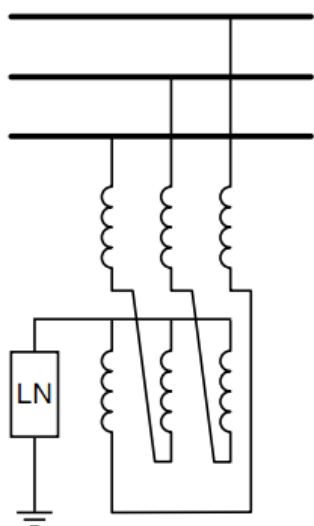


Figura 2.10 - Reatância de neutro sem o neutro acessível

As proteções podem ser configuradas para 10 a 20 % da corrente máxima de defeito. A função de proteção é menos restritiva do que no caso de neutro usando uma resistência, especialmente considerando o elevado valor de I_{LN} dado que o I_C é menor [Schneider-2008].

2.2.8.2 Resistência de Neutro e sistema de proteção

Neste caso é colocada uma resistência entre o ponto de neutro e a terra. Neste tipo de sistema de neutro, a impedância resistiva limita a corrente de defeito à terra I_{K1} e permite uma situação satisfatória na eliminação de sobretensões. Este regime de neutro é utilizado em sistemas de distribuição públicos e industriais em MT [Schneider-2008].

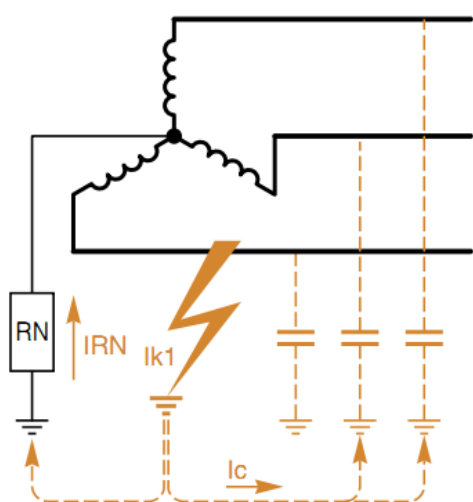


Figura 2.11 - Defeito à terra no regime de neutro ligado à terra por uma resistência

Contudo, as proteções têm de atuar automaticamente ao primeiro defeito. Em sistemas de energia que alimentam máquinas rotativas, o valor da resistência é calculado de modo a que o valor da corrente de defeito I_{K1} oscile entre os 15 A e os 50 A. Em sistemas de distribuição de energia, são utilizados valores mais elevados (100 A a 300 A) uma vez que são mais fácil de detetar e permitem a eliminação sobretensões resultantes de descargas atmosféricas [Schneider-2008].

As principais vantagens da utilização deste regime são as sintetizadas de seguida:

- Este sistema apresenta um bom compromisso entre a baixa corrente de defeito e fácil eliminação de sobretensões;
- Não exige equipamento com isolamento fase-terra dimensionado para tensões compostas (fase-fase);
- Os sistemas de proteção são simples, seletivos e a corrente é limitada [Schneider-2008].

Relativamente às desvantagens podemos enumerar as seguintes:

- A continuidade de serviço é bastante afetada e os defeitos à terra têm de ser eliminados o mais rápido possível, disparo ao 1º defeito;
- Quanto maior a tensão e a corrente a limitar, maior serão os custos da resistência de ligação à terra [Schneider-2008].

Se o ponto de neutro estiver acessível (Ligação em estrela), a resistência de terra deve ser ligada entre o neutro e a terra (Figura 2.11) ou através de um transformador monofásico com uma carga resistiva equivalente no enrolamento secundário (Figura 2.12) [Schneider-2008].

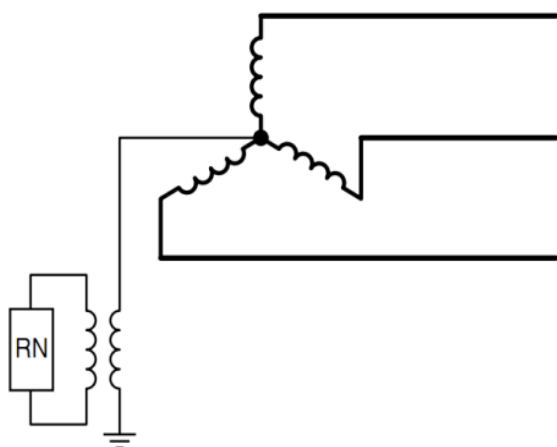


Figura 2.12 - Transformador monofásico com carga resistiva

Quando neutro não está acessível (Ligação em triângulo), ou se após uma análise ao sistema de proteções se constata que é apropriado, é criado um neutro artificial usando o “zero sequence generator⁵” ligado ao barramento que consiste num transformador especial com um valor de reatância homopolar muito reduzido [Schneider-2008].

Para a deteção da corrente de defeito I_{k1} que é um valor baixo, são necessárias outras proteções, exceto a de máxima intensidade de corrente. As proteções de defeitos à terra detetam a corrente de defeito [Schneider-2008]:

- Diretamente na ligação do neutro à terra (Figura 2.13 “1”)
- Nas 3 fases, individualmente ou em conjunto (Figura 2.13 “2, 3”).

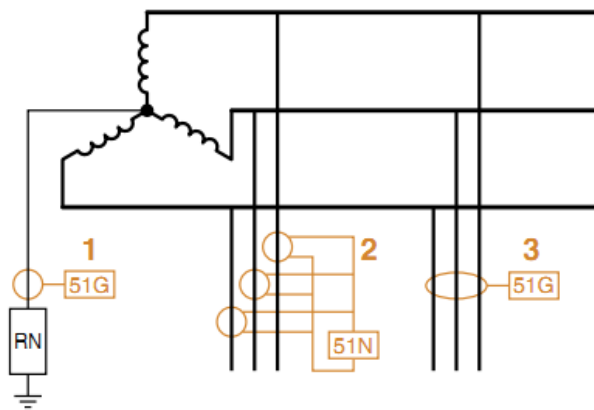


Figura 2.13 - Proteção de defeitos à terra

O intervalo das proteções é definido de acordo com a corrente I_{k1} que é calculada sem ter em atenção o sistema de alimentação e a ligação da impedância em conformidade com 2 regras [Schneider-2008]:

- 1,3 Vezes a corrente capacitiva a jusante do sistema de proteção;
- Configurando uma gama entre 10 a 20 % do valor máximo de corrente de defeito à terra.

⁵ Transformador trifásico usado para criar o ponto de neutro num sistema elétrico para o regime de neutro

2.2.8.3 Bobine de Petersen ou Neutro ressonante

A utilização deste regime de neutro em redes aéreas e mistas em MT implica a instalação da bobine de Petersen nas subestações AT/MT (Escalier, 2001). A bobine de Petersen, que recebeu o nome do seu criador, Waldemar Petersen em 1916 é também conhecida como supressora de arcos, neutralizadora de defeitos ou bobine de extinção. Sistemas com este regime de neutro são também conhecidos como neutro ressonante ou sistema compensado ([Schneider-2008]; (Grid, 2002)).

A bobine Petersen é normalmente ligada ao neutro do transformador de distribuição ou ligada ao transformador em zigzag, de modo a que a corrente de defeito seja praticamente nula quando ocorre um defeito ((Roberts, 2001); [Schneider-2008]), a contribuição para a corrente de defeito, da corrente da capacidade das linhas (onde um defeito à terra circula desde um condutor saudável para a terra) é compensada pela corrente da bobine (Griffel, 1997). O valor da indutância na bobine de Petersen tem de ser igual ao valor das capacidades da rede, a qual pode variar, tal como quando ocorrem comutações na rede. Quando isso acontece o sistema está completamente compensado, ou 100 % sintonizado. Os controladores modernos monitorizam constantemente a tensão homopolar e detetam qualquer alteração que ocorra nas capacidades da rede. O controlador ajusta-se automaticamente para o novo nível, garantindo que a bobine de Petersen está corretamente sintonizada para neutralizar qualquer defeito à terra que possa ocorrer. Esta rápida limitação da corrente defeito ocorre automaticamente sem qualquer intervenção de outro sistema ((HV Power, 2012) ; (Roberts, 2001)).

Se a frequência de ressonância do circuito coincidir com a frequência do sistema, o circuito está sintonizado, permanece no defeito um baixo valor de corrente devido as perdas ativas da bobine (Griffel, 1997). Se a indutância da bobine não se igualar à capacitância do sistema, o sistema não está de sintonizado. Assim sendo o sistema pode estar sobrecompensado ou subcompensado, dependendo da relação entre a indutância e a capacitância. Por outras palavras, um sistema que não está 100% sintonizado tem duas condições possíveis de operação (Roberts, 2001):

Indutância	>	Capacitância	->	Sistema sobrecompensado
Capacitância	<	Indutância	->	Sistema subcompensado

A rede é ligada à terra através de uma bobine, cuja reatância é normalmente igual à capacitância do sistema. Sob estas condições, um defeito monofásico não

origina um defeito em condições estacionárias. Este efeito assemelha-se mais a um sistema isolado (Grid, 2002).

A rede é chamada “Tuned” ou ligada à terra através de uma bobine de Petersen, quando o ponto de neutro é ligado à terra e existe uma bobine de elevada qualidade cujo valor da indutância é ajustado para manter a “sintonização” (condição de ressonância) está colocado entre as capacidades da rede e a bobine (Figura 2.14) (Fulchiron, 2001).

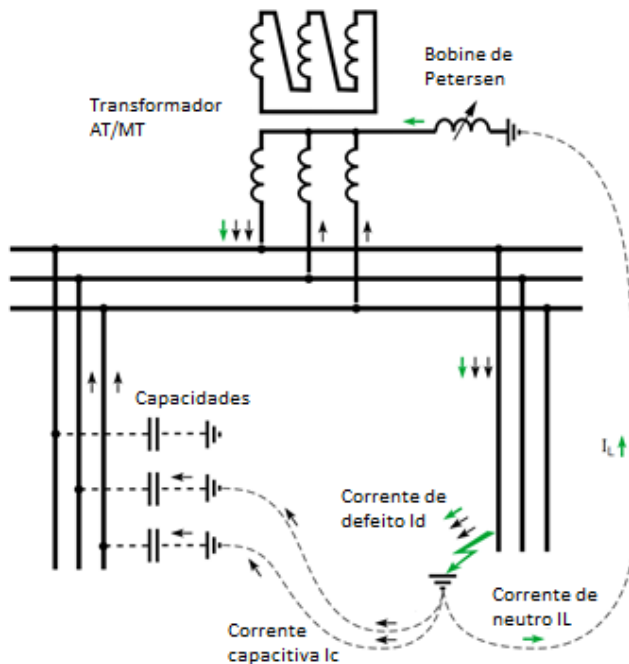


Figura 2.14 - Princípio de funcionamento da Bobine de Petersen

Quando ocorre um defeito: $\vec{I}_L \approx -\vec{I}_C \Rightarrow I_d \approx 0$

Quando as fases da rede estão ligadas à terra, esta “sintonização” resulta num valor muito baixo da corrente de defeito ($I_d = I_c - I_L$). Esta corrente é apenas devido à imperfeição na “sintonização”, o desequilíbrio capacitivo entre as fases e as perdas resistivas da bobine (Fulchiron, 2001).

A amplitude normal para este tipo de defeitos é de poucos amperes (2 A até 20 A). A condição de ressonância é expressa da seguinte forma $LC\omega^2 = 1$, onde:

- | | | |
|----------|---|--|
| L | - | Indutância |
| C | - | Capacidades (Soma das 3 fases) |
| ω | - | Frequência Angular ($\omega = 2\pi F = 2\pi * 50$) |
| | - | Redes de 50 Hz |

Quando a reatância de terra e capacitância do sistema de elétrico estão sintonizados ($LC\omega^2 = 1$) [Schneider-2008]:

- A corrente de defeito é mínima;
- A corrente é resistiva;
- O defeito autoextingue-se.

Se a condição de ressonância for mantida, durante as variações de configuração da rede ou durante as alterações climáticas, isso implica que a bobine seja ajustada de forma expedita. A “sintonização” é feita, geralmente, através de um sistema de controlo automático (Fulchiron, 2001).

Este regime de neutro é utilizado principalmente no norte e leste da Europa. A rede tem de ser isolada entre as fases e a terra devido à tensão entre as linhas. A energia dissipada durante o defeito é facilmente controlada e de baixo valor se o desfasamento for pequeno. A fim de alcançar este objetivo, um sistema automático é muitas vezes utilizado com o intuito de seguir as variações das capacidades devido a alterações frequentes na tipologia da rede.

A deteção de defeitos torna-se uma tarefa difícil de executar, isto porque não se pode apoiar na proteção de sobreintensidades. A tecnologia usada nos sistemas de proteção antigos era bastante complexa e ineficiente em termos de fiabilidade e de sensibilidade. Muitas vezes, durante defeitos à terra, o fornecimento de energia continuava operacional, o sistema exigia sistemas redundantes o que tornava a operação do sistema bastante complicada. No entanto a qualidade de serviço mostrava-se excelente (Griffel, 1997).

Este regime permite que os arcos elétricos se autoextingam evitando a religação das proteções (Griffel, 1997). A Bobine de Petersen deve ser empregue com o objetivo de reduzir ao mínimo a corrente produzida por um defeito fase-terra.

Devido à sua resistência interna, a bobine não consegue anular completamente a corrente de defeito, circula sempre uma corrente residual impossível de anular. Essa corrente residual não é preocupante, quando inferior a um certo limite, isto porque, nestas condições, o arco elétrico extingue-se facilmente. Uma vez que a configuração da rede é variável, é possível compensar as variações das capacidades à terra das linhas e, naturalmente, o valor das correntes de defeito através da variação da indutância da bobine de Petersen (E.D.P, 2012a).

Estudos recentes, revelam que a bobine de Petersen apresenta uma elevada eficiência quando comparada com sistemas de neutro ligado diretamente à terra ou

neutro isolado (E.D.P, 2012a). Este regime usa-se em sistemas de distribuição públicos e industriais em MT com elevada corrente capacitiva [Schneider-2008].

A maior vantagem deste regime de neutro é a autoextinção da maior parte dos defeitos. Oferece ainda uma boa continuidade de serviço para redes que possuem muitas linhas aéreas. É natural que as falhas de isolamento dos equipamentos e dos cabos, especialmente os subterrâneos, não beneficiem deste comportamento. Além disso, redes com este regime de neutro podem suportar os defeitos, como acontece com o regime de neutro isolado. O limite desta operação está normalmente associada à resistência térmica da impedância de neutro a qual é sujeita a tensão composta durante toda a duração do defeito (Fulchiron, 2001).

A maior desvantagem deste regime de neutro reside na dificuldade em localizar defeitos permanentes e alguns defeitos sistemáticos. Esta dificuldade surge devido ao baixo valor de corrente que circula através de um defeito quando comparado com os elevados valores da corrente capacitiva que circulam em simultâneo nas linhas. A deteção da corrente residual não consegue distinguir as fases sãs das não sãs. É necessária a introdução de proteções direcionais de sobreintensidades residuais, ou até proteções de sobrecargas residuais para assegurar o alto desempenho do regime. O uso destas proteções é possível instalando-as apenas nas subestações, sendo totalmente irrealista a sua instalação em instalações ao longo da rede, visto que é um equipamento bastante dispendioso e complexo. Os detetores de defeitos têm o mesmo princípio de funcionamento que as proteções direcionais, mas seriam demasiado caros, e consequentemente não existem. Por esta razão, o uso desta rede é seriamente comprometida quando ocorre um defeito permanente: a tensão na linha só pode ser reposta após as linhas serem inspecionadas (Fulchiron, 2001).

Nos níveis superiores de tensão, nomeadamente nos 60 kV, que o regime de neutro ressonante tem um impacto mais favorável na qualidade da Energia, porque a percentagem de defeitos fase-terra é maior e, portanto, mais eficaz. É nesses níveis de tensão que se ligam, normalmente, os grandes utilizadores industriais que são as maiores vítimas dos cortes e cavas de tensão. Por isso, em países que tradicionalmente adotam o regime de neutro ressonante (como a Alemanha), esta opção é aplicada até aos 110 kV inclusive, (até aos anos 50 era até aos 220 kV). A contrapartida dessa opção é uma rigorosa exigência com a qualidade do isolamento das linhas, transformadores e restante equipamento das subestações e PT's, dada a tensão composta permanente entre as fases e a terra para a qual têm de ser dimensionados (Pinto de Sá, 1996).

Nos níveis de tensão inferiores (15 kV), as vantagens do regime de neutro ressonante, embora importantes, são globalmente muito menos eficazes, porque não

conseguem a autoextinção de mais de 50% do elevado número total de defeitos que os caracterizam. Por outro lado, à medida que o processo de urbanização prossegue e a percentagem de cabos subterrâneos aumenta (com capacidades à terra da ordem de 40 vezes a das linhas aéreas), este regime vai perdendo o seu interesse enquanto as suas exigências sobre os isolamentos aumentam. Não admira, por isso, que, para estes níveis de tensão inferiores, em certas regiões da Alemanha se assistiu a um movimento inverso ao que a EDF prosseguiu, com a transformação de redes ressonantes em redes ligadas à terra através de baixas impedâncias (Pinto de Sá, 1996).

Estas dificuldades tornam este regime de neutro impróprio para redes com elevada quantidade de cabos subterrâneos. Contudo, desenvolvimento tecnológico recente tem permitido a criação de novos detetores que funcionam com sensores de baixo custo. Este recente desenvolvimento pode simplificar a operação em redes com este regime de neutro (Fulchiron, 2001).

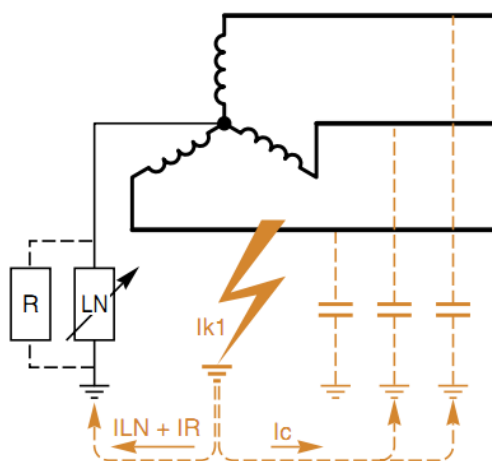


Figura 2.15 - Defeito à terra usando a bobine de Peterson

Este sistema é usado para compensar a corrente capacitiva do sistema de energia. A corrente de defeito é a soma das correntes que circulam nos seguintes circuitos [Schneider-2008]:

- Circuito da reatância terra;
- Corrente através das capacidades das linhas sãs.

As correntes capacitivas e indutivas compensam se umas às outras desde que:

- Uma seja indutiva (no circuito terra);
- A outra seja capacitiva (Capacidades das linhas sãs).

As correntes podem-se adicionar em fases opostas, na prática, devido à ligeira resistência da bobine, existe uma pequena corrente resistiva de poucos amperes (Figura 2.16) [Schneider-2008].

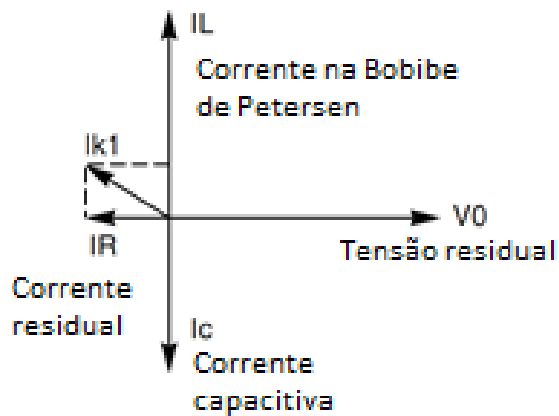


Figura 2.16 - Vetor das correntes durante um defeito à terra

As principais vantagens da utilização deste regime são as sintetizadas de seguida:

- Reduz a corrente de defeito, mesmo que a capacidade entre fase e terra seja elevada:
 - Extinção espontânea de defeitos não permanentes.
- A tensão de contacto é limitada no local do defeito;
- A instalação permanece em serviço mesmo em caso de um defeito permanente;
- O primeiro defeito é indicado através da corrente que circula através da bobine [Schneider-2008].

Relativamente às desvantagens podemos enumerar as seguintes:

- O custo da reatância de terra pode ser elevado uma vez que precisa de ser modificada para ser adaptada à compensação;
- É necessário garantir que a corrente residual no sistema elétrico durante o defeito não é perigosa para as pessoas ou equipamentos;
- Há um elevado risco de sobretensões transitórias no sistema elétrico;
- Tem de existir sempre pessoal para supervisionar;
- É difícil implementar o sistema de proteções para o primeiro defeito [Schneider-2008].

CAPÍTULO 2

A deteção dos defeitos é feita de acordo com a componente ativa da corrente residual, o defeito cria correntes residuais em todo o sistema elétrico, mas é no circuito de defeito que circulam correntes resistivas residuais. Em adição, as unidades de proteção devem ter em atenção as recorrentes autoextinções dos defeitos.

Capítulo 3

Aplicações da Bobine de Petersen

3.1 Situação existente na rede portuguesa

Em Portugal, na EDP o regime de neutro mais comum é o neutro ligado à terra através de uma impedância e neutro isolado, sendo que neste momento está em curso o programa de uniformização do regime de neutro (PURN) com o objetivo de existir um único regime de neutro em Portugal continental, o neutro ligado à terra através de uma impedância. No entanto a bobine de Petersen com as vantagens que apresenta seria uma ótima solução.

Nas subestações, no lado MT caso o neutro não esteja acessível poderemos ter o caso de regime de neutro isolado ou em último caso será criado um neutro artificial, que será assegurado pela instalação de uma reatância trifásica limitadora da corrente, 300 A para linhas aéreas/mistas ou de 1000 A para cabos subterrâneos no caso de defeitos fase-terra, ligada a cada barramento de MT, podendo temporariamente funcionar em regime de neutro isolado (E.D.P, 2007).

3.2 Mudanças de Regime de Neutro

Todas as grandes empresas fundamentam as suas escolhas iniciais em critérios económicos e técnicos, de acordo com as características técnicas e físicas do local. As empresas tiveram que lidar com os regimes de neutro escolhido e resolver os diversos problemas que advêm desse regime.

Mudar um regime de neutro nos dias de hoje, significa na melhor das hipóteses rever todo o sistema de proteções, uma operação extremamente dispendiosa. No pior dos casos (mudar de neutro distribuído para neutro não distribuído ou vice-versa) significa reconfigurar a rede toda.

Como é previsível e já foi referido qualquer uma das diferentes soluções adotadas tem as suas vantagens e desvantagens (Griffel, 1997).

Como já foi referido anteriormente, a mudança do regime de neutro é uma tarefa tremendamente dispendiosa que deve ser bem estudada, pesando os prós e contras de cada solução antes de implementar o regime de neutro. Quando se pretende modificar o regime de neutro é preciso ter especial atenção no sentido de

saber se o isolamento original dos materiais suporta as novas tensões de funcionamento a que vai ser sujeito [Mazon-2001].

3.3 Necessidade do Neutro Ressonante

Da vasta panóplia de regimes de neutro existentes, o regime de neutro ressonante foi o que destacou mais pelas suas vantagens. Este sistema permite controlar a corrente de defeito qualquer que seja a corrente capacitiva produzida pelo sistema em qualquer período, isto traduz-se em melhores condições de segurança e numa melhor qualidade de serviço devido à autoextinção dos defeitos (Griffel, 1997).

As redes com o neutro ressonante têm ganho popularidade nos últimos anos em redes de distribuição, devido principalmente ao aumento significativo na continuidade de serviço. O número de saídas de serviço é reduzido significativamente, levando a uma redução de custos para a empresa (Bjerkan, 2005).

Infelizmente, esta técnica também acarreta desvantagens sendo mais visíveis em certas redes. A falta de sensibilidade e seletividade dos relés de proteção, a falta de flexibilidade na estrutura da rede e a proteção deficiente contra defeitos muito resistivos significa que esta solução é medíocre para determinadas redes. Para terras em que a resistência se situa entre os 30 e 40 ohms, são necessários avultados investimentos em bobines com núcleo de imersão (Griffel, 1997).

A maioria dos defeitos (cerca de 80 %) que ocorrem nos sistemas elétricos de distribuição são defeitos monofásicos e constituem uma das principais causas da fraca continuidade de serviço ([Mazon-2001]; (Zamora, 2004)). Estes podem ser devidos a arcos elétricos em isoladores poluídos, devido à comutação normal das linhas ou descargas atmosféricas, envelhecimento do isolamento do cabo, contacto com árvores, entre outros [Mazon-2001]. O neutro ressonante favorece a autoextinção do arco elétrico em defeitos de linhas aéreas para cerca de 80 % dos defeitos temporários à terra. Considerando que 80 % dos defeitos na rede são temporários, podemos concluir que cerca 60 % dos defeitos em linhas aéreas são eliminados sem causar o disparo das proteções (Roberts, 2001).

Os defeitos à terra em sistemas isolados, com elevada impedância e compensados não afetam o triângulo das tensões compostas, logo é possível continuar a operar o sistema ainda que com o sistema em condição de defeito. Contudo, o nível de isolamento do sistema deve ser entre fases e todas as cargas têm de ser ligadas entre as fases.

Para estes sistemas são usados equipamentos com religação automática. O resultado das interrupções/restabelecimento da tensão representa um grande

problema para os consumidores com grandes cargas rotativas ou aqueles com cargas intolerantes a quedas de tensão (Roberts, 2001).

As instalações mais antigas utilizam bobines com valores fixos de baixo valor. Nestes sistemas a condição de sintonização, quer o sistema seja sobrecompensado ou subcompensado, altera-se com a configuração da rede de distribuição.

Reatâncias com comutador de tomadas permitem um controlo manual ou automático das condições de sintonização. As instalações modernas incluem nas bobines núcleos amovíveis equipados com um sistema de controlo que oferecem quase 100 % da sintonização para todas condições em que o sistema pode funcionar. Estes sistemas fornecem um meio suave de ajuste do sistema (Roberts, 2001).

Sistemas com neutro ressonante podem reduzir a corrente de defeito entre 3 a 10 % relativamente a um sistema com neutro isolado. Quando ocorre sintonização completa do sistema, as perdas ativas da bobine, os harmónicos do sistema, e corrente de fuga do sistema determinam a magnitude da corrente de defeito (Roberts, 2001).

Os métodos de compensação da corrente residual injetam corrente através da bobine para o sistema durante o defeito, reduzindo a corrente de defeito para valores próximos de zero (Roberts, 2001). A ação de autoextinção do arco depende não só da magnitude da corrente de defeito, mas também, da recuperação temporária da tensão após a extinção com sucesso do arco elétrico na passagem da corrente por zero. Nos sistemas compensados o tempo de recuperação da tensão é muito mais lento do que em sistemas isolados.

A deteção de defeitos muito resistivos em sistemas compensados exige equipamentos de correntes muito sensíveis. O método direcional *Wattmetric*, é o tipo de elementos direcionais usado mais frequentemente. Contudo, a cobertura do defeito resistivo à terra deste elemento é limitado pela regulação do nível da sobretensão homopolar (Roberts, 2001).

Nas atuais redes de distribuição a substituição de linhas aéreas por redes subterrâneas aumenta as capacidades das linhas, originando um aumento da corrente de defeito. Deste modo, redes subterrâneas mesmo com pequenos comprimentos podem ter um efeito substancial no valor da corrente de defeito. A corrente indutiva produzida pela bobine anula a corrente do defeito capacitivo. Assim, a corrente residual que circula no sistema traduz-se numa insignificante componente resistiva (Zamora, 2004).

Uma das principais vantagens deste regime de neutro é a possibilidade de a rede funcionar durante um período de tempo (várias horas) na presença de um defeito que afeta apenas uma fase (Zamora, 2004). Uma forma de melhorar substancialmente

o índice de duração média de interrupção do sistema (DMIS⁶) e o índice de duração média de interrupção no cliente (DMIC⁷) é continuar a operar a rede em segurança mesmo na presença de defeitos. O neutro ressonante (ou redes compensadas) está cada vez a ganhar mais seguidores pelo mundo fora (HV Power, 2011).

Experiências realizadas em Itália, França, Alemanha onde milhares de redes têm sido convertidas para neutro ressonante, têm demonstrado uma redução substancial nas falhas de energia na ordem dos 50 %. Recentemente no Reino Unido as empresas de distribuição de energia elétrica têm optado pela conversão dos regimes de neutro, optando pelo neutro ressonante devido às vantagens do mesmo (HV Power, 2011).

O neutro ressonante é especialmente benéfico em redes aéreas rurais onde frequentemente ocorrem defeitos devido a descargas atmosféricas, aves, vegetação entre outros. Este regime de neutro também se pode aplicar em redes subterrâneas com o principal objetivo de manter a qualidade de serviço, visto que nestas redes quando ocorre um defeito é maioritariamente definitivo. Estes defeitos resultam frequentemente em interrupções de alimentação para os consumidores e fazem aumentar os índices DMIS e o DMIC (HV Power, 2011).

A eficiência deste método está dependente da precisão de sintonização do valor da reatância, resultante de alterações no sistema, requerem alterações na reatância da bobine (Grid, 2002).

Em redes de média tensão utilizando a bobine de Petersen, a probabilidade da ocorrência de defeitos duplos nos pontos fracos na rede aumenta (Hutter, 2009).

3.4 Implementação do Neutro Ressonante em Portugal

O nível de isolamento das redes com ligação à terra neutro por uma bobina de compensação tem de ser dimensionado para tensões compostas (Folliot, 2001). Isto porque quando ocorre um defeito fase-terra, a fase onde ocorre o defeito fica ao potencial da terra enquanto já as outras duas fases são submetidas a tensões compostas (Electrotechnik, 2009).

Como já foi referido o regime de neutro em Portugal mais comum é o neutro ligado à terra através de uma impedância e o neutro Isolado, sendo que um dos principais inconvenientes da implementação deste regime é o fator económico. Mudar o regime de neutro de uma rede acarreta grandes encargos financeiros e ainda profundas reestruturações a nível do sistema de proteções.

⁶ Termo em inglês SAIDI (System Average Interruption Duration Index)

⁷ Termo em inglês CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index)

3.5 Análise de sistemas de distribuição compensados

A operação da análise de redes de distribuição compensadas é muito importante para identificar as alternativas disponíveis para a detecção de defeitos nestes sistemas.

O mecanismo de autoextinção do arco elétrico de defeitos à terra em cabos subterrâneos não é tão eficaz como em linhas aéreas porque quando o isolamento do cabo se danifica, normalmente é definitivo. Mesmo que o arco se autoextinguisse durante a passagem da corrente por zero, o isolamento danificado volta a falhar quando a tensão simples atinge um nível maior que o isolamento suportaria depois de danificado.

O resultado é o restabelecimento do defeito. O restabelecimento de defeitos produz repetidas sobretensões sobre as fases sãs que eventualmente conduzem a ocorrências de novos defeitos.

Dada a baixa probabilidade da autoextinção, muitas empresas do ramo utilizam disjuntores sem religação para os cabos de distribuição quando as proteções detetam defeitos à terra. Outra solução é a introdução de corrente residual de compensação no sistema de controlo da bobine de Petersen. Este sistema reduz a corrente de defeito até zero, reduzindo deste modo o restabelecimento do defeito. É possível o funcionamento do sistema mesmo com defeito.

Em resumo, os tipos básicos de defeitos à terra redes com o neutro ressonante são defeitos com autoextinção, defeitos restabelecidos e defeitos sustentados. Os defeitos restabelecidos são defeitos com autoextinção que se tornam repetitivos como resultado da quebra permanente do isolamento. Defeitos sustentados incluem todos os defeitos permanentes e alguns defeitos temporários não eliminados pelo mecanismo de extinção do arco no neutro ressonante (Roberts, 2001).

3.6 Caraterísticas da Bobine de Petersen

A Eletricidade de França (EDF) tem como especificação técnica a HN 52-S-25, que reúne os critérios, restrições, condições de aceitação e os procedimentos de teste para as bobines de Petersen. As bobines de Petersen são construídas para funcionarem em redes de 15 kV ou 20 kV. São fabricadas dois tipos: a 1ª com um intervalo ajustável desde os 100 até 600 A de corrente de defeito reativa e a 2ª com um intervalo desde os 100 até 1000 A. Depois do ajustamento da bobine de Petersen, a corrente de defeito resultante da tensão homopolar não deve exceder os 40 A (Folliot, 2001)).

Para assegurar o correto funcionamento dos sistemas de proteções homopolar *Wattmetric* e *Voltmetric*, a componente ativa da corrente do defeito deve ser superior a 20 A (Folliot, 2001).

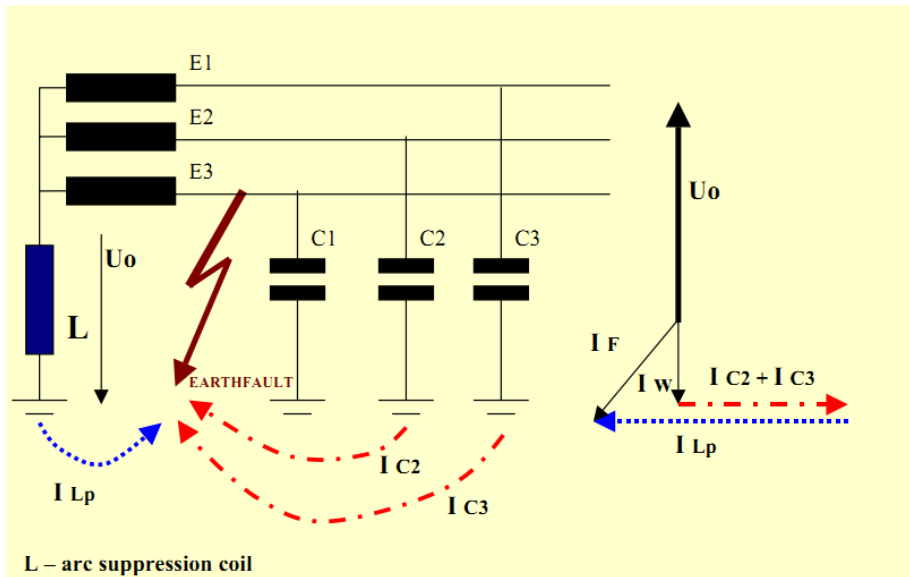


Figura 3.1 – Defeito usando Bobine de Petersen

A Bobine de Petersen é constituída pelas seguintes partes (EGE, 2011):

- Cuba que tem no seu interior o circuito magnético e circuitos principais, enrolamentos auxiliares bem como equipamentos de medição;
- Reservatório do óleo com capacidade de expansão;
- Unidade motora que assegura o funcionamento dos núcleos incluindo a caixa de controlo de regulação, sinalização luminosa, disjuntores, etc;
- Indicador mecânico de ajuste de corrente da Bobine de Petersen;
- Sinalização de avarias (Termómetro, Proteção de Bucholz, nível do óleo);
- Válvula para verificação do óleo e enchimento do reservatório.



Figura 3.2 - Bobine de Petersen, Exemplo da EGE

Os equipamentos que equipam as Bobines de Petersen da EGE, obedecem a normas DIN (Deutsches Institut für Normung) sendo a maioria desses equipamentos comprados a fabricantes alemães (EGE, 2011).

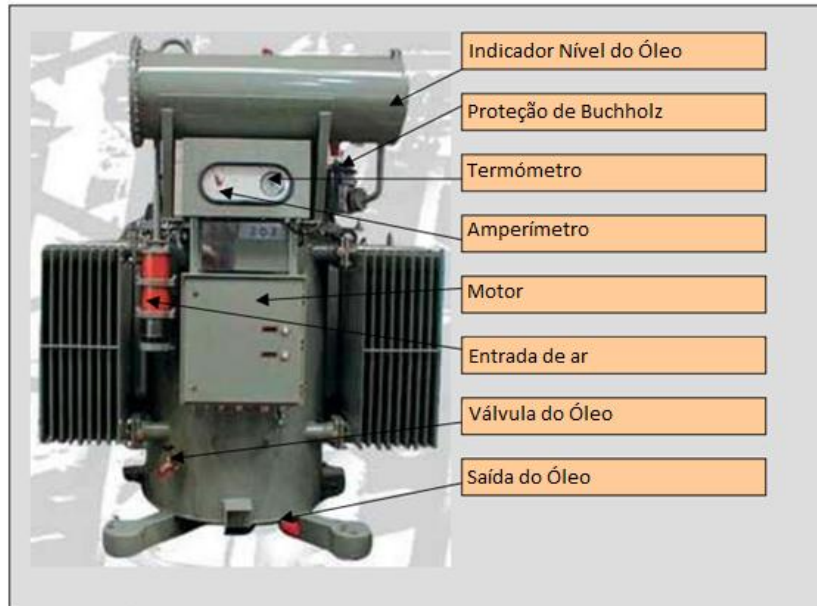


Figura 3.3 - Descrição pormenorizada da Bobine de Petersen (Modelo ASR 1.6 da EGE)

3.6.1 Regulação Contínua:

As Bobines de Petersen fabricadas pela EGE podem ser ajustadas com elevada precisão ao valor da corrente necessária, devido à indutância das bobines que

pode variar continuamente através do ajuste dos núcleos pertencente ao seu circuito magnético (EGE, 2011).

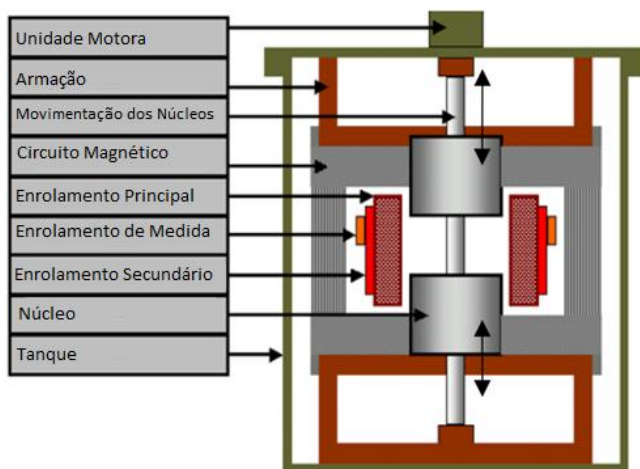


Figura 3.4 - Esquema pormenorizado do interior da Bobine de Petersen

A bobine de Petersen tem as seguintes funções (Escalier, 2001):

1. Criação de um ponto neutro, a partir de uma única ligação sobre os três condutores de MT da subestação, à saída do transformador de AT/MT;
2. Variação da impedância variável, colocada entre o neutro (a função de criação do ponto neutro) e a terra;
3. Comando e controlo, proporcionando uma interface entre:
 - a. A posição da bobine de Petersen,
 - b. Automatismo de sintonização do sistema ou o controlo da posição.
4. Controlo manual da posição da bobine de Petersen, também chamado de "operação local";
5. Transformador para injeção de corrente homopolar para sintonização da bobine

3.6.2 Caraterísticas técnicas

Frequência nominal: $f_N = 50 \text{ Hz}$

Tensão nominal: $U_N = 21,4 \text{ kV}$

Corrente do neutro nominal: $I_N = 600 \text{ A}$ ou $I_N = 1000 \text{ A}$

Regime de Funcionamento Nominal

Para garantir o bom desempenho operacional destes dispositivos, define-se um regime operacional que representa o regime mais rigoroso em que o dispositivo pode ser submetido a falhas na rede MT. Este regime assume uma temperatura ambiente de 40 ° C e consiste em dois estados de sucessão na sequência de um ciclo (Escalier, 2001):

Estado A

A bobine de Petersen em regime permanente, na ausência de defeitos permanentes. É alimentada pela tensão nominal, com uma tensão homopolar constante igual a 6% de $U_N/\sqrt{3}$ aos seus terminais. O aquecimento da bobine de Petersen devido ao fluxo da corrente gerada pela tensão permanente não deve exceder os valores especificados pela norma IEC 60076-2 capítulo 4 (Escalier, 2001).

Estado B

Partindo do estado A, a bobine de Petersen é colocada em condições de um defeito franco fase-terra na rede, durante 10 s. Aparece então a tensão homopolar nos terminais da bobine.

A bobine de Petersen tem a obrigação de suportar a repetição deste regime a cada 3 horas, independentemente da configuração da corrente indutiva do neutro (Escalier, 2001).

3.6.3 Caraterísticas de configuração

3.6.3.1 Intervalos de funcionamento da impedância

A representação da bobine de Petersen num esquema homopolar é uma impedância (Z), constituída por um resistência (R) e uma reatância (X) em paralelo. No seu intervalo de temperatura operacional, as seguintes condições são verificadas (Escalier, 2001):

Tabela 3.1 – Intervalo de impedância da bobine de Petersen

Modelo da Bobine de Petersen	Reatância (X)		Resistência (R)
	Valor mínimo	Valor máximo	Independente de configuração
$I_n = 600 \text{ A}$	$20,6 \, \Omega (\pm 5 \%)$	$124 \, \Omega (\pm 20 \%)$	$R < 618 \, \Omega$
$I_n = 1000 \text{ A}$	$12,4 \, \Omega (\pm 5 \%)$	$124 \, \Omega (\pm 20 \%)$	$R < 618 \, \Omega$

Estas condições sobre a resistência e a reatância estão de acordo com os valores medidos na tensão homopolar reduzida e a tensão homopolar, à frequência nominal.

Para as diferentes posições de configuração, a diferença entre o valor medido entre a tensão homopolar reduzida e a tensão homopolar completa não deve exceder 5% para a reatância e 20% para a resistência (Escalier, 2001).

3.6.3.2 Intervalos de funcionamento da corrente de neutro

A bobine de Petersen é alimentada com a tensão nominal e colocada na sua gama de temperatura de operação. Num defeito fase-terra, (Estado B do regime de funcionamento) temos (Escalier, 2001)

Tabela 3.2 – Valores admissíveis para a corrente de neutro

Modelo da Bobine de Petersen	Corrente indutiva do neutro I_L		Corrente resistiva do neutro I_R
	Valor mínimo	Valor máximo	Independente de configuração
$I_n = 600 \text{ A}$	$100 \text{ A } (\pm 20 \%)$	$600 \text{ A } (\pm 5 \%)$	$I_R > 20 \text{ A}$
$I_n = 1000 \text{ A}$	$100 \text{ A } (\pm 20 \%)$	$1000 \text{ A } (\pm 5 \%)$	$I_R > 20 \text{ A}$

Estas condições da corrente de neutro dizem respeito à tensão homopolar reduzida e a tensão de homopolar completa à frequência nominal.

Para as diferentes posições de configuração, a diferença entre o valor medido da tensão homopolar reduzida e a tensão homopolar completa não deve exceder 5% para a corrente indutiva do neutro e 20% para a corrente resistiva do neutro. A diferença entre o valor exibido da corrente de neutro e o valor real da tensão homopolar completa, para diferentes configurações, deve ser inferior a 5% (Escalier, 2001).

3.6.4 Correntes de defeitos admissíveis

Após a sintonização da bobine de Petersen a corrente de defeito não deve ser superior a 40 A (Escalier, 2001).

3.6.5 Transformador para injeção de corrente homopolar para sintonização da bobine

Para permitir a utilização de sistemas de ajuste realizando uma injeção de corrente homopolar, a bobine de Petersen tem um transformador monofásico na rede em defeito, injetando uma corrente homopolar.

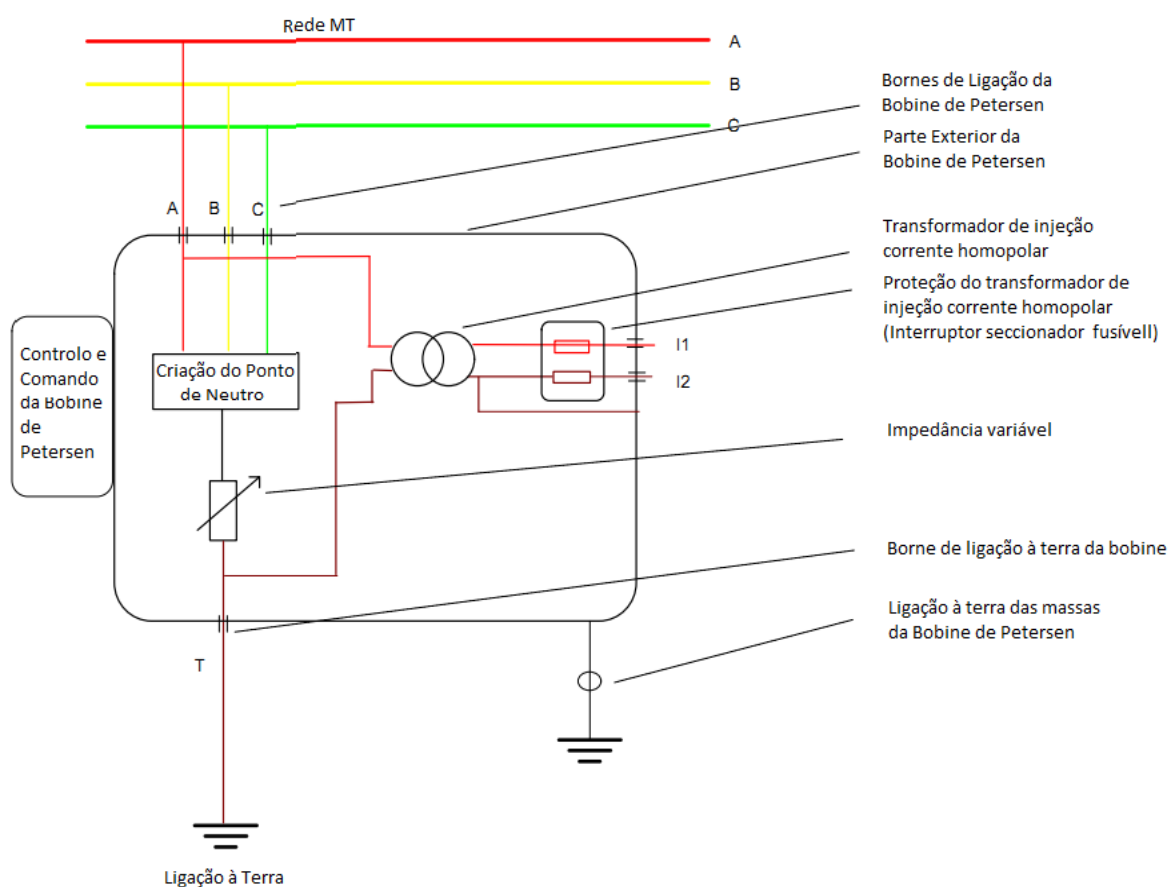


Figura 3.5 - Diagrama esquemático da Bobine de Petersen

3.6.6 Comando de controlo da bobine de Petersen

Os requisitos relativos à conceção do comando e controlo da bobine de Petersen, as condições de instalação e utilização, os elementos constitutivos de materiais e os métodos de controlo e de teste do sistema de controlo da bobine de Petersen são dados na especificação técnica HN 46-R-01 (Escalier, 2001).

Um interruptor de controlo integrado na bobine de Petersen permite seleccionar o modo de controlo (Escalier, 2001):

- Controlo pelo sistema de sintonização automático da bobine de Petersen;
- Operação Local.

3.7 Sistema de proteção para o Neutro Ressonante

No neutro ressonante a corrente de defeito tem um valor muito baixo, por isso é impossível usar uma proteção de sobreintensidades comum para estas redes, sendo necessário o uso de proteções direcionais. A razão pela qual se usam proteções direcionais prende-se com o facto de a corrente de defeito na fase em defeito ser muito menor que o total da corrente de defeito capacitiva no circuito a proteger. A corrente residual vai atrasar o deslocamento do neutro das tensões se a corrente capacitiva de defeito à terra for menor do que a soma dos vetores da corrente indutiva da bobina de Petersen e se for menor que a corrente capacitiva das outras fases. A corrente residual vai, por outro lado, conduzir ao deslocamento do neutro das tensões se a condição não for satisfeita. Além disso, a corrente residual, no circuito em defeito num sistema que utiliza a bobine de Petersen, é significativamente menor do que o total da corrente de defeito. Isto significa que as perdas no sistema homopolar irão afetar a diferença dos ângulos de fase entre a corrente residual e o deslocamento do neutro da tensão (ABB, 2010).

A diferença dos ângulos da fase entre a corrente residual e a tensão de deslocamento de neutro não é um critério fiável para a deteção de um defeito à terra. A corrente residual terá, no entanto, uma componente que está em fase com o deslocamento do neutro da tensão. Este componente pode ser aumentado pela instalação de uma resistência no ponto neutro na subestação (ABB, 2010).

Num sistema com o neutro ressonante um defeito à terra não é um circuito curto, mas um estado anormal. Deve ser sinalizado e corrigido tão rapidamente quanto possível. A técnica como os defeitos são identificados depende da configuração da rede (Siemens, 2005).

Em redes com topologia radial, são utilizados equipamentos de medição direcionais de defeitos sensíveis à terra com seno (φ), num sistema em malha a medição de defeitos temporários à terra é preferencial (Siemens, 2005).

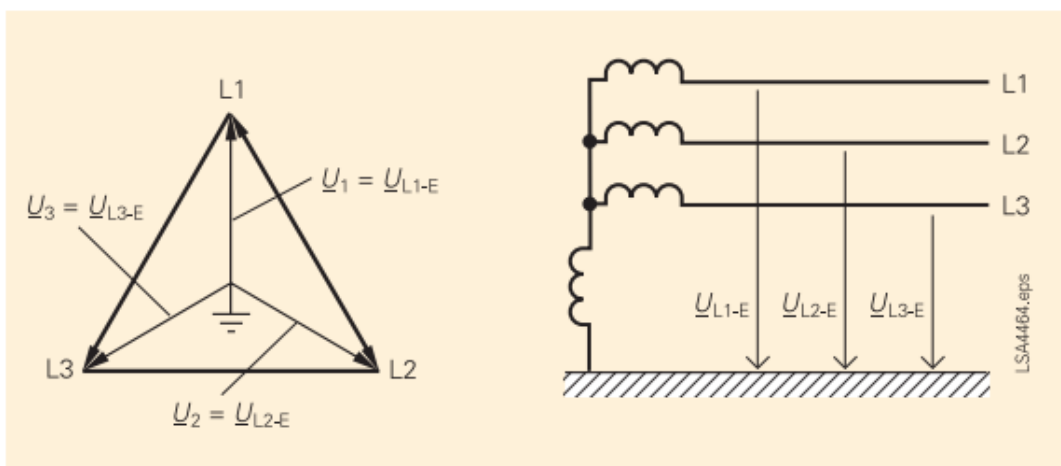


Figura 3.6 - Tensões normais de funcionamento

No caso de um defeito à terra sem uma resistência, na fase L3, o valor da tensão de U_{L3-E} cai para zero e as tensões U_{L2-E} e U_{L1-E} aumentam $\sqrt{3}$ vezes, ou seja, para a tensão composta. O deslocamento da tensão U_{E-N} aumenta. Isto também é referido como tensão homopolar (U_0). Sob condições normais de funcionamento o valor da tensão é entre fase-terra (Siemens, 2005).

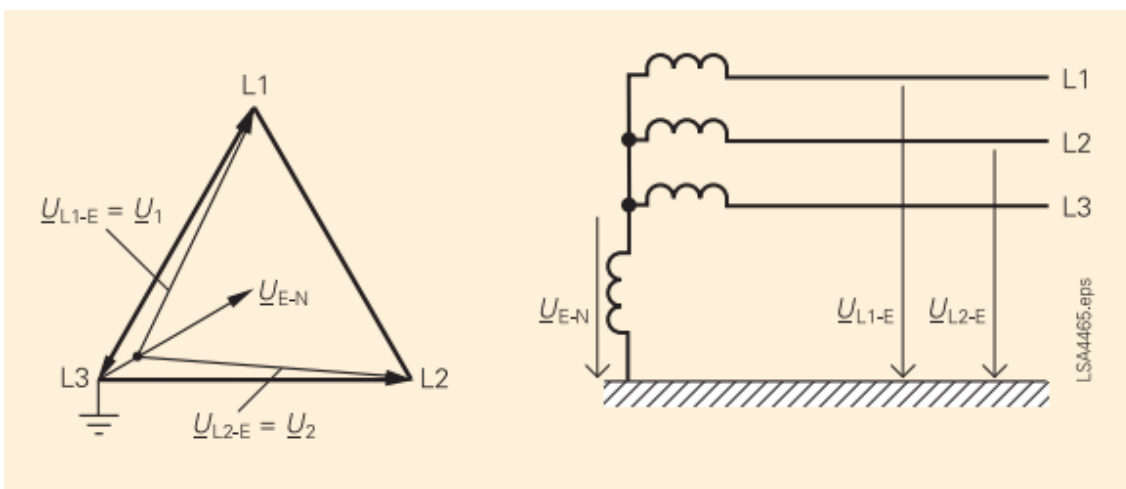


Figura 3.7 - Tensões do sistema em caso de defeito

A corrente de defeito capacitiva no local de defeito é compensada pela corrente indutiva da bobina de Petersen de modo a que a corrente ativa no local de defeito seja muito pequena. No entanto uma corrente residual resistiva permanece no sistema e é determinada pela parte ôhmica da bobina. Este valor situa-se na ordem dos de 3% da corrente capacitiva da bobina. A tensão de U_{E-N} é avaliada para sinalizar defeitos à terra (Siemens, 2005) .

O sistema de medição Wattmétrica de defeitos à terra só é apropriado para sistemas radiais. Se for utilizada num sistema de malha, os resultados significativos só podem ser obtidos após comutação para linhas radiais (Siemens, 2005).

3.8 Detecção de defeitos à terra com o relé 7SN60 da SIEMENS

Se o sistema é em malha, a indicação da direção do defeito pode não ser clara usando relés *Wattimétricos*. A direção da corrente no caso de um defeito à terra pode não ser detetada corretamente. Bons resultados são obtidos para localizar os defeitos utilizando o relé de defeitos transitórios à terra. Estes relés trabalham através do processo de inversão de carga, que ocorre com um defeito à terra. A capacidade da fase afetada pelo defeito à terra é descarregada para a terra e as fases saudáveis são submetidas até ao valor mais elevado de tensão, tensão composta (Siemens, 2005) .

Esta inversão de carga produz uma grande corrente, o que representa um aumento de três ou quatro vezes o valor da corrente capacitiva. Os relés de defeitos transitórios à terra são, portanto, sempre ligados ao circuito *Holmgreen*. O circuito *Holmgreen* adiciona as três correntes de fase através da correta ligação dos transformadores e, portanto, fornece a corrente que circula para a terra. É importante estar consciente de que o processo de inversão da carga só ocorre quando o defeito à terra ocorre, ou seja, apenas uma vez. Medições efetuadas após comutação, não têm nenhum significado e podem levar a confusões (Siemens, 2005).



Figura 3.8 – Relé de deteção de defeitos à terra (7SN60) da SIEMENS

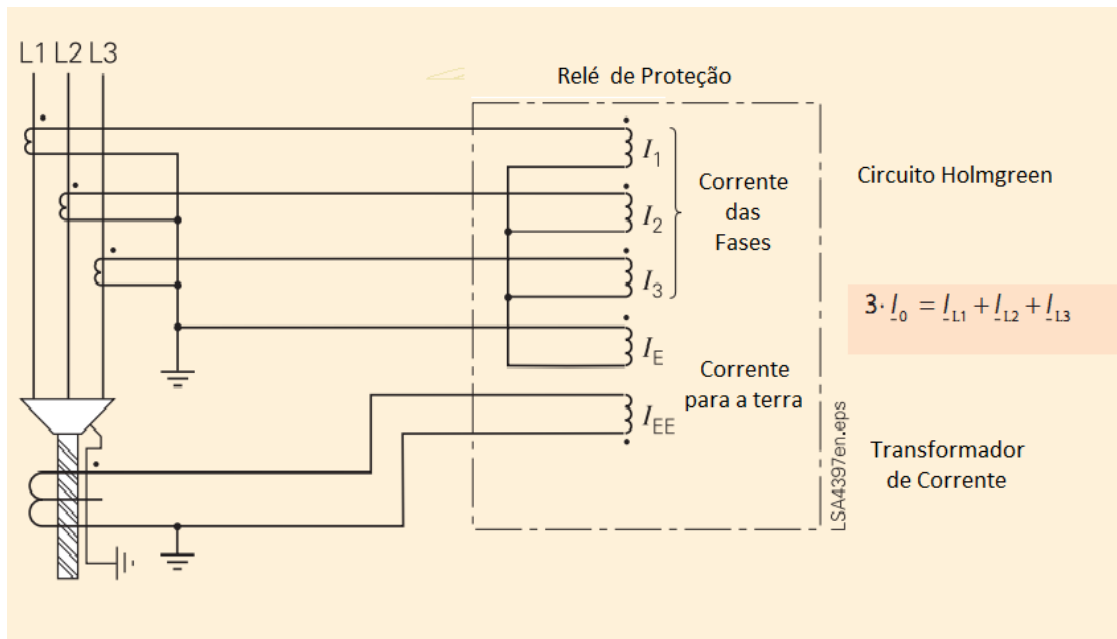


Figura 3.9 - Esquema de ligação dos equipamentos de medição da corrente

Com o objetivo de identificar o circuito afetado pelo defeito num sistema em malha, é necessária uma indicação de ambas as extremidades da linha. Ambos os relés devem indicar um sentido. Por conseguinte, é aconselhável transferir os sinais a partir do relé para uma imagem do sistema. É então possível localizar rapidamente onde o defeito à terra está localizado. Na (Figura 3.10), a falha está localizada no meio da linha ST 4 à linha ST 3, já que os dois relés indicam que o defeito se encontra à sua "Frente" (Siemens, 2005).

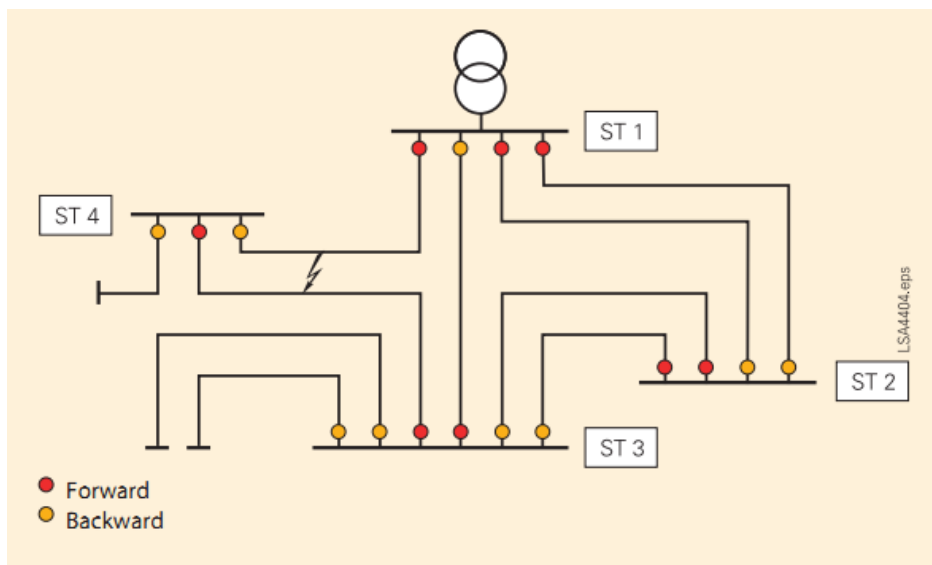


Figura 3.10 - Funcionamento do relé em caso de um defeito

Neste regime a operação pode continuar quando um defeito à terra ocorre. O defeito pode ser localizado, tal como descrito acima. O operador deve intervir o mais rápido possível e separar o local em defeito do resto do sistema. Assim um duplo defeito (como um curto-circuito – causaria uma interrupção de fornecimento) pode ser evitado (Siemens, 2005) .

Na prática, fazer coincidir na perfeição o valor da reatância da bobine e a capacitância do sistema pode-se revelar uma tarefa difícil. Por essa razão, uma pequena corrente de defeito vai circular no sistema. A bobine de Petersen é encontrada mais frequentemente em áreas rurais com redes aéreas, e é particularmente vantajosa em locais sujeitos a um elevado número de defeitos (Grid, 2002).

Para perceber como aplicar corretamente as proteções de defeito à terra para sistemas que utilizam a bobine de Petersen, primeiro deve-se perceber o comportamento do sistema sob condições de defeitos à terra (Grid, 2002).

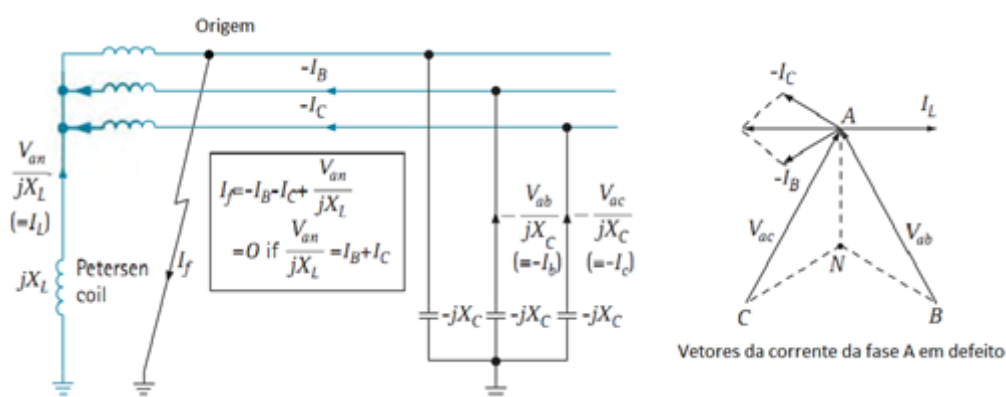


Figura 3.11 - Sistema com defeito no regime de neutro com a bobine de Petersen

A Figura 3.11 exemplifica de forma simplificada uma rede ligada à terra através da bobine de Petersen. A figura mostra que, se a bobine de Petersen está corretamente ajustada, não vai circular nenhuma corrente de defeito (Grid, 2002). A soma do vetor I_C com o I_B será igual ao I_L .

A Figura 3.12 mostra um sistema de distribuição radial usando o regime de neutro ressonante, cujo circuito tem um defeito na fase C. Na Figura 3.13 apresentam-se os diagramas fasoriais resultantes, assumindo que não existe nenhuma resistência (Grid, 2002).

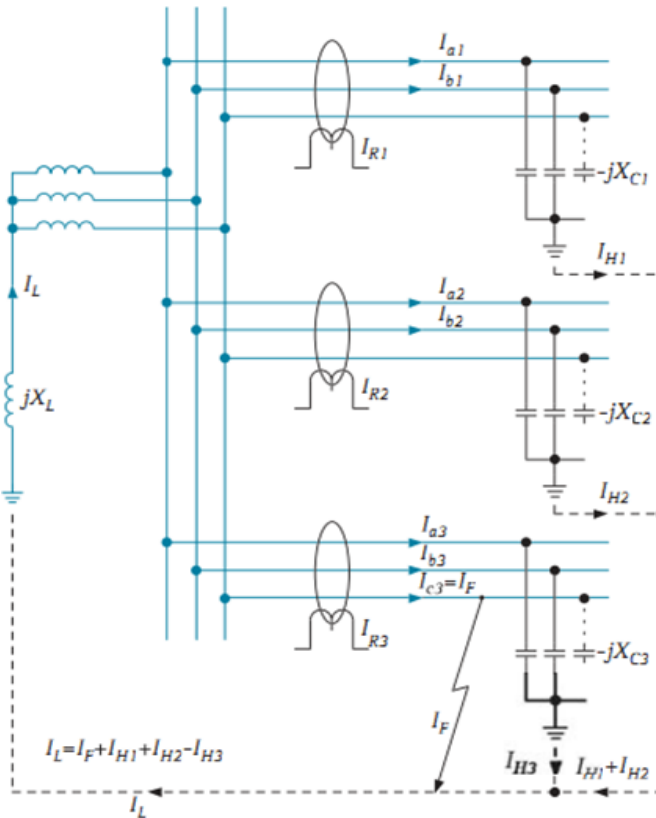


Figura 3.12 – Distribuição das correntes na fase C durante um defeito numa rede radial

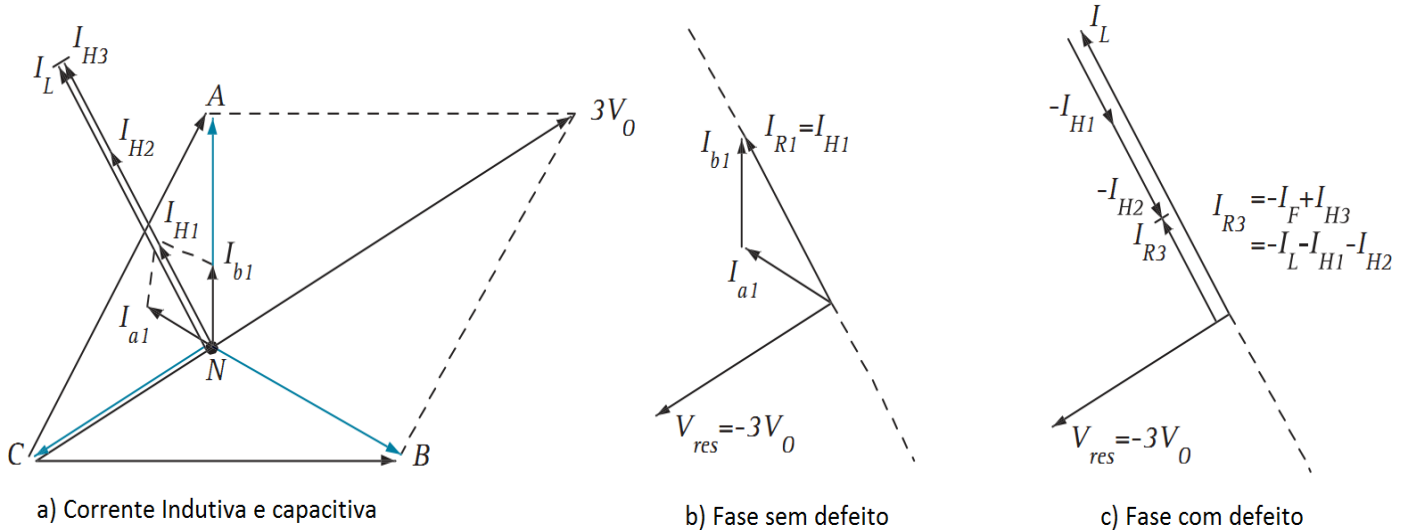


Figura 3.13 – Fase C com defeito à terra no regime usando a bobine de Petersen: Caso teórico – Sem resistência presentes no X_L ou X_C

Na Figura 3.13(a) podemos observar que o defeito origina nas fases saudáveis um aumento da tensão na ordem de $\sqrt{3}$ vezes e as correntes das cargas sofrem um deslocamento de 90° .

Usando transformadores de corrente homopolar, o desequilíbrio das correntes pode ser visto nas fases saudáveis pela simples soma dos vetores I_{a1} e I_{b1} , que se

encontra desfasada exatamente 90° da tensão residual (Figura 3.13 (b)). A magnitude da corrente de defeito I_{R1} é 3 vezes o valor da corrente em regime permanente por cada fase. No circuito em defeito, a corrente residual é igual a $I_L - I_{H1} - I_{H2}$ como demonstra a Figura 3.13 (C) (Grid, 2002).

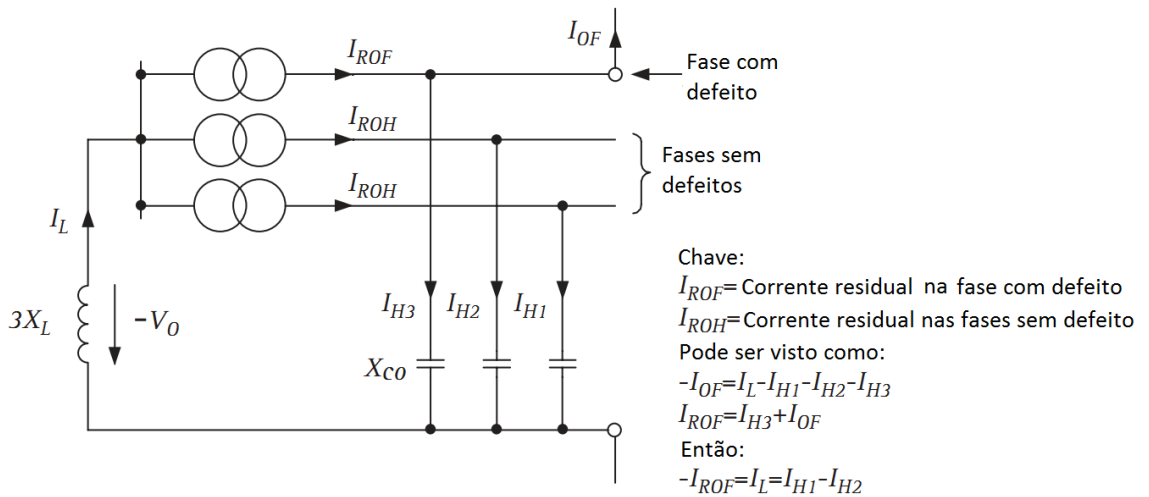


Figura 3.14 – Correntes residuais homopolares

Em termos práticos, existe uma resistência no circuito e a Figura 3.15 apresenta o diagrama de fasores resultantes. Se a tensão residual V_{res} for usada como a tensão de referência, a corrente residual está com um deslocamento inferior a 90° na fase em defeito e com um deslocamento superior a 90° nas fases sãs (Grid, 2002).

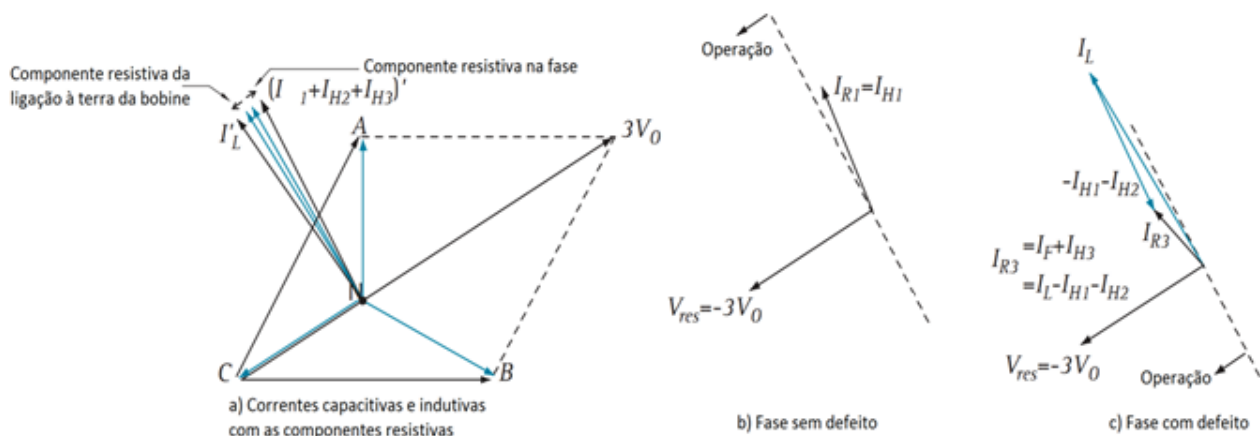


Figura 3.15 - Fase C com defeito à terra no regime usando a bobine de Petersen: Caso pratica – Com resistência presentes no XL ou XC

Assim, um relé direcional pode ser usado, e com o ângulo do relé de fase 0° , a corrente residual dos circuitos sem defeitos cairá na área 'restrita' da caraterística do relé, enquanto a corrente residual do defeito irá cair na área de 'operação'. Muitas vezes, é inserida uma resistência em paralelo com a bobina de Petersen para

assegurar que a corrente de defeito é corretamente medida e aumentar a diferença angular entre os sinais residuais para auxiliar a aplicação do relé de proteção.

Tendo estabelecido que uma proteção direcional pode ser usada, existem duas possibilidades para o tipo de elemento de proteção que pode ser aplicado – defeitos à terra sensíveis e wattimétrico homopolar (Grid, 2002).

3.8.1 Proteção de defeitos sensíveis à terra

Para aplicar este tipo de proteção, o relé deve cumprir dois requisitos essenciais (Grid, 2002):

- Configuração da medição de corrente deve poder ser ajustada para valores muito baixos;
- Relé com ângulo de fase 0° e capaz de um ajuste próximo deste valor.

Um elemento sensível de corrente é necessário por causa da corrente muito baixa que pode circular no sistema – por isso, configurações inferiores a 0,5% da corrente nominal podem ser necessárias. No entanto, a compensação através da bobina de Petersen pode não ser totalmente perfeita. Baixos níveis de corrente de defeito do regime permanente irão circular no sistema e aumentar a corrente residual vista pelo relé. Um valor usado frequentemente na configuração é a corrente por fase do circuito a ser protegido.

Um bom ajuste do relé com ângulo de fase também é necessário sobre a configuração de 0° , para compensar a bobina e a alimentação das resistências e do desempenho do transformador de corrente usado. Na prática, esses ajustes são realizados de forma mais eficaz no local através da aplicação de defeitos intencionais e do registo dos resultados obtidos (Grid, 2002).

3.8.2 Proteção sensível Watimétrico

Pode ser vista na Figura 3.15 uma pequena diferença angular entre o desvio de corrente nas fases saudáveis e fases com defeito. A Figura 3.16 ilustra como esta diferença angular dá origem à componente ativa da corrente que se encontra em fase oposta (Grid, 2002).

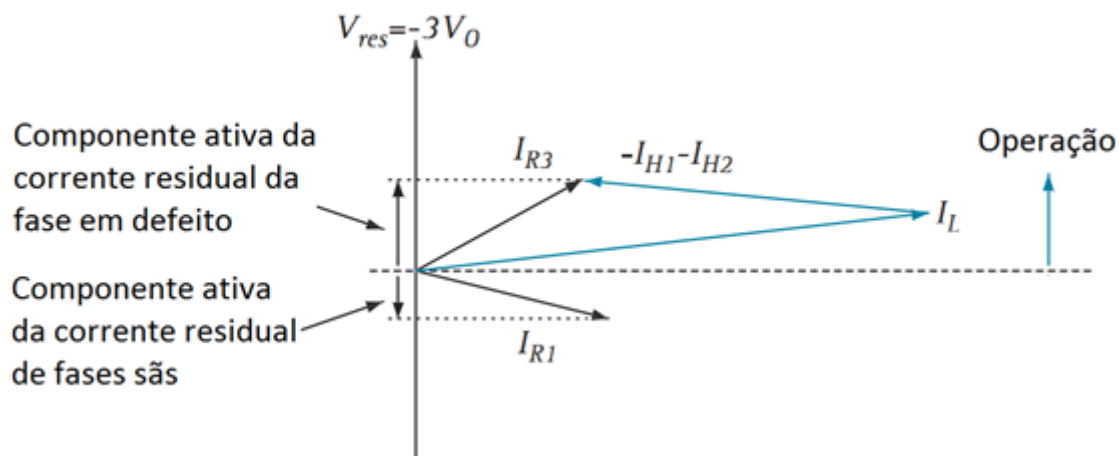


Figura 3.16 - Componentes resistivas da corrente

Consequentemente, as componentes ativas do sistema homopolar, vão também estar em situações semelhantes e um relé é capaz de detetar potência ativa e tomar uma decisão. Se o componente *wattimétrico* de potência homopolar deteta para a frente, indica um defeito nas fases, enquanto a potência no sentido inverso indica um defeito em qualquer parte do sistema. Este método de proteção é mais popular que o método de defeitos sensíveis à terra, e pode proporcionar uma maior segurança relativamente a defeitos intempestivos e a saídas simuladas nos transformadores de corrente sob condições de não defeitos à terra (Grid, 2002).

Na prática, a potência ativa é calculada com base nos valores residuais em detrimento dos valores homopolares. Os valores obtidos são, portanto, nove vezes as quantidades homopolares dos valores residuais de corrente e de tensão. A equação utilizada é a seguinte (Grid, 2002):

$$\begin{aligned}
 & V_{res} \times I_{res} \times \cos(\varphi - \varphi_c) \\
 & = 9 \times V_0 \times I_0 \times \cos(\varphi - \varphi_c)
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Onde:

V_{res}	-	Tensão Residual
I_{res}	-	Corrente Residual
V_0	-	Tensão Homopolar
I_0	-	Corrente Homopolar
φ	-	Angulo entre V_{res} e I_{res}
φ_c	-	Caraterísticas do angulo do relé

3.9 Métodos de detecção de defeitos à terra para redes de distribuição usando a bobine de Petersen

O método wattimétrico é uma solução comum com elementos direcionais para sistemas compensados, mas a sua sensibilidade é limitada para defeitos resistivos, não superior a alguns Kiloohms. Outros métodos de frequência fundamental para sistemas compensados (tal como o método das admitâncias) possibilita um aumento de sensibilidade, mas necessita de informação mais detalhada sobre a possibilidade de executar ações de controlo na bobine de Petersen. Há outros métodos que utilizam o conteúdo harmónico em regime permanente da corrente e tensão para detetar defeitos. Um outro grupo de métodos deteta componentes transitórios de corrente e tensão originados pelo defeito. Estes métodos possuem sensibilidade limitada, porque os defeitos de alta resistência reduzem o conteúdo harmónicos do estado permanente e amortecem os componentes transitórios de corrente e tensão (Roberts, 2001).

A detecção de defeitos de alta impedância em sistemas compensados de distribuição requer um dispositivo com uma entrada de corrente residual muito sensível. O método *watimétrico* direcional, já referido neste trabalho, é o elemento direcional que é normalmente utilizado. Entretanto, a cobertura para defeitos resistivos destes elementos é limitada pela supervisão da configuração de sobretensões homopolares (Roberts, 2001).

Os métodos de detecção de defeitos à terra são normalmente baseados em grandezas homopolares. São diversos os métodos de detecção dos defeitos à terra para redes de distribuição compensadas e podem ser classificados de acordo com as componentes dos sinais de entradas dos relés que usam para a detecção dos defeitos. Para isso os métodos são agrupados nas seguintes 4 categorias (Roberts, 2001):

- 1.1 Frequência Fundamental
- 2.1 Baseado nos harmónicos
- 3.1 Baseado nas componentes transitórias
- 4.1 Métodos especiais

Os métodos incluídos nos dois primeiros grupos usam a informação correspondendo ao estado permanente do defeito na rede de distribuição. Alguns destes métodos necessitam ainda de alguma informação do regime permanente antes do defeito. O método do grupo 3 usa a informação do processo transitório gerado pelo defeito. O grupo 4 inclui os métodos que usam informação em regime estacionário, mas que exigem ações de controlo na bobine de Petersen, injeção de corrente ou

sintonização imperfeita temporária, o que se torna dispendioso ((Pinto de Sá, 1996); (Roberts, 2001); (Bjerkan, 2005)).

Alguns destes métodos têm sido combinados com o objetivo de detetar e localizar o defeito. A aplicação mais comum é a utilização da deteção da tensão homopolar para a ligação de uma resistência em paralelo com a bobina de Petersen e aumentar a corrente homopolar com o intuito de utilizar o método *wattimétrico* para a localização dos circuitos com defeito. Isto é feito desde que a corrente homopolar do sistema seja muito pequena para ser detetada fiavelmente quando comparada com o desequilíbrio do sistema. A descarga / recarga transitória durante o início do defeito pode ser usada para detetar a direção do defeito em redes compensadas e isoladas. A bobina de Peterson representa uma impedância elevada para os transitórios. Isto significa que os transitórios não são severamente afetados e podem ser aplicados para localizar defeitos em redes compensadas e isoladas (Bjerkan, 2005).

Os componentes da frequência fundamental da tensão e corrente fornecem informações mais fiáveis e importantes para a deteção de defeitos muito resistivos nos sistemas compensados de distribuição. O conteúdo harmónico da corrente de defeito à terra é pequeno e instável, especialmente para defeitos muito resistivos. As componentes transitórias da tensão e da corrente são severamente amortecidas por defeitos muito resistivos. Os métodos que necessitam algum tipo de controlo da bobina de Petersen ou injeção de corrente oferecem uma elevada sensibilidade, porém requerem equipamentos bastante oneroso.

Todos os métodos conhecidos que usam a frequência fundamental e que proporcionam elevada sensibilidade requerem informações de todos os alimentadores e/ou algum tipo de controlo da bobina de Petersen ou injeção de corrente. Por exemplo, o método da admitância requer informações de todos os alimentadores. O método da admitância também precisa do controle da bobina de Petersen ou injeção de corrente. O método *watimétrico* é uma boa solução para defeitos pouco resistivos, porém tem limitações de sensibilidade na deteção de defeitos muito resistivos.

Os novos métodos que serão abordados posteriormente apenas necessitam de informações do sistema e não requerem o controlo da bobina de Petersen ou injeção de corrente. Os métodos são adequados para dispositivos “*stand-alone*” de elevada sensibilidade que podem ser instalados em qualquer ponto da rede de distribuição. Uma aplicação típica é na unidade de controlo de automatismos de religação automática (Roberts, 2001).

3.9.1 Detecção da tensão

Os defeitos à terra em sistemas compensados reduzem o valor da tensão simples na fase em defeito e alteram o regime de neutro, aumentando a tensão homopolar na maioria dos casos. A tensão homopolar e as tensões simples (fase-terra) têm sido usadas como indicadores de defeitos à terra. Contudo, para defeitos muito resistivos a alteração da tensão pode ser muito reduzida. Alguns investigadores têm proposto o uso da tensão homopolar incremental com o objetivo de aumentar a sensibilidade de deteção.

Outro problema que se coloca é que a tensão homopolar tem quase o mesmo valor em toda a rede de distribuição. A queda de tensão provocada pelas correntes homopolares que circulam através da impedância homopolar das linhas e dos transformadores é muito pequena quando comparada com a queda de tensão através das impedâncias fase-terra do sistema. Por outras palavras, os métodos de deteção de defeitos baseados na tensão não são seletivos. Eles detetam o defeito à terra, mas não identificam o elemento em defeito. É necessário desligar manualmente e religar todos os circuitos da subestação para detetar o defeito. Estas pequenas interrupções representam um problema para a qualidade de energia e de serviço. Por esta razão, a deteção da tensão é tipicamente usada como função de partida para métodos seletivos de deteção de defeitos em redes de distribuição compensadas (Roberts, 2001).

3.9.2 Método *Wattimétrico*

Métodos seletivos de deteção de defeitos à terra exigem informação sobre o valor da corrente. A solução clássica são os relés homopolares direcionais. Para redes isoladas o relé varimétrico responde com a componente em quadratura da corrente homopolar em relação à tensão homopolar. Para redes compensadas o relé usa a componente real da corrente homopolar.

Por outro lado, o sinal da fase, da componente ativa de I_0 é sempre positivo para defeitos inversos e negativo para defeitos diretos. Podemos usar um relé direcional wattimétrico que tenha a seguinte grandeza de saída (* = conjugado complexo) (Roberts, 2001):

$$W = \text{Re}[\bar{V}_0 \times \bar{I}_0^*] = V_0 I_0 \cos \varphi_0 \quad 3.2$$

Podemos comparar o valor obtido na 3.2 com os valores limites positivo e negativo ($+\varepsilon$ e $-\varepsilon$). Então, $W < -\varepsilon$ indica um defeito direto e $W > +\varepsilon$ indica um

defeito inverso. A característica de operação do relé watimétrico é também representada na Figura 3.17 (Roberts, 2001).

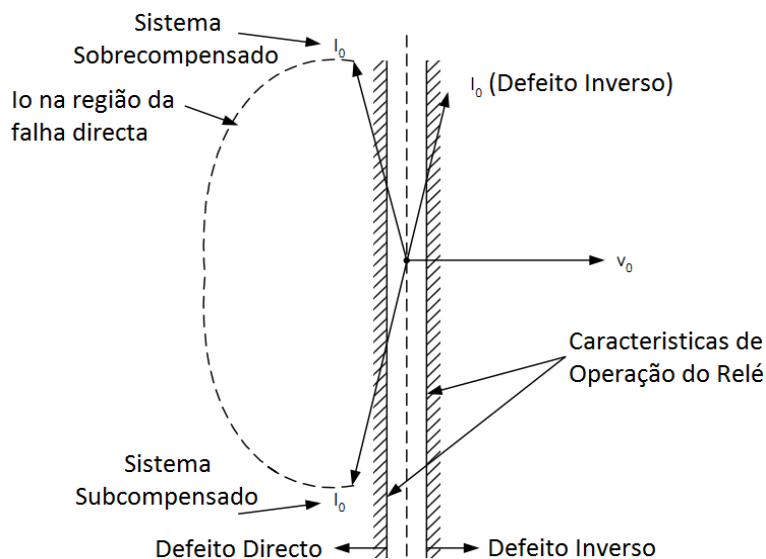


Figura 3.17 - Diagrama fasorial típico para defeitos à terra e caraterísticas de operação do relé *watimétrico* (32 W) usado em sistemas compensados

A Figura 3.18 representa um diagrama lógico simplificado de um elemento watimétrico (32 W). A componente ativa de I_0 é muito pequena durante um defeito à terra, então o relé deve ser muito sensível (ϵ deve ser muito pequeno). Para se evitarem operações incorretas do relé durante as condições normais do sistema, adiciona-se uma função de partida respondendo à magnitude de V_0 . Logo, a sensibilidade do relé watimétrico é determinada pela sensibilidade do elemento V_0 . O valor limite de V_0 deve ser maior do que o valor de V_0 para desequilíbrios normais do sistema. Um ajuste típico é de cerca de 20% da tensão nominal do sistema (Roberts, 2001).

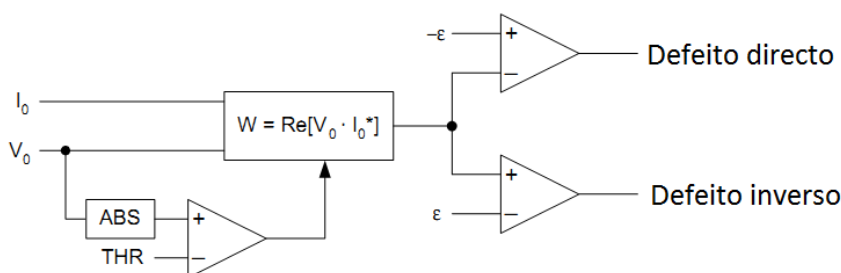


Figura 3.18 - Diagrama lógico simplificado de um elemento do relé *watimétrico* (32 W)

O método wattimétrico tem sido usado durante muitos anos em sistemas compensados. É simples, seguro e fiável para defeitos pouco resistivos. Contudo, a necessidade da deteção da tensão homopolar limita a sensibilidade do método

Wattimétrico para defeitos muito resistivos. Outra desvantagem é que este método é muito sensível a problemas de precisão dos transformadores de corrente. A ligação dos relés aos três TI, os erros dos ângulos pode provocar uma alteração no sinal de saída (W). Um cuidado especial ao calibrar os transformadores da corrente é uma solução possível, mas a soma dos fluxos dos transformadores de correntes é fortemente recomendada para relés wattimétricos.

Algumas empresas usam relés de tensão homopolar para detetar defeitos à terra em sistemas compensados e colocam automaticamente uma resistência em paralelo com a bobine de Petersen ou num enrolamento auxiliar na bobine. Para defeitos muito resistivos, a ligação de uma resistência reduz a tensão homopolar sem necessariamente aumentar a corrente de defeito homopolar, na saída do elemento wattimétrico é visível essa diminuição. A outra limitação deste método é a diminuição da sensibilidade resultante do uso da tensão homopolar para a deteção de defeitos (Roberts, 2001). Podemos aplicar o método wattimétrico para a deteção de defeitos em todo o tipo de sistemas de distribuição que tenham baixos valores de corrente de defeito à terra. Isto inclui o neutro isolado, sistemas muito impedantes e compensados. Contudo, para sistemas com o neutro isolado o método varimétrico apresenta uma sensibilidade superior que o método wattimétrico, devido à componente em quadratura da corrente homopolar que é sempre maior que a componente na fase para defeitos neste sistema (Roberts, 2001).

3.10 Novos métodos de deteção de defeitos à terra para redes de distribuição usando a bobine de Petersen

3.10.1 Método da Condutância

O método da condutância é de natureza direcional. Ele responde ao sinal da parte real da admitância medida. Esta é uma vantagem quando comparado com o método das admitâncias, o qual responde à magnitude da admitância e não usa informações relevantes da fase. O método da condutância funciona com a relação da corrente/tensão. O resultado deste método é relativamente independente das magnitudes da tensão e corrente homopolar. Isso é uma vantagem desse método relativamente ao método *watimétrico*, que falha na deteção de defeitos muito resistivos causadas por baixos valores da tensão e corrente homopolar. Convém lembrar que o elemento *watimétrico* é um elemento do tipo-produto e o elemento de condutância é um elemento do tipo-relação (Roberts, 2001).

3.10.2 Método da Condutância Incremental

O tradicional método da condutância descrito em cima funciona bem nos sistemas equilibrados e para erros pequenos dos TI. O desequilíbrio dos TI e do sistema introduzem erros no valor medido da condutância, por consequência, limitam a sensibilidade. Uma solução para este problema é o método da condutância incremental.

O elemento de condutância incremental (32C) compara a condutância incremental medida, a parte real da relação entre a corrente incremental/tensão incremental, com valores limites positivo e negativo para distinguir defeitos diretos dos defeitos inversos. Este é um método direcional do tipo-relação que não é afetado pelo desequilíbrio do sistema e que pode ser usado pelos convencionais transformadores de correntes. A Figura 3.19 detalha as condutâncias incrementais medidas para defeitos diretos e inversos e a característica de operação do relé de condutância incremental (duas linhas paralelas) (Roberts, 2001).

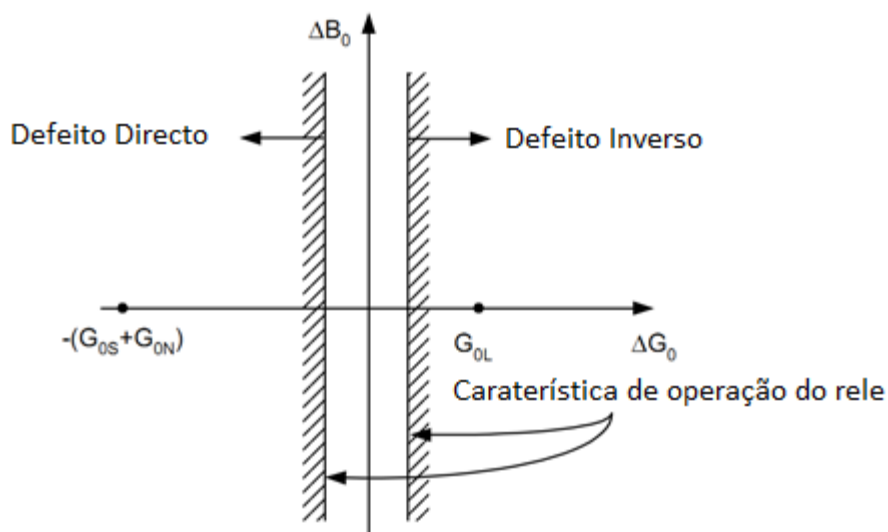


Figura 3.19 - Elemento da condutância incremental (32C) caraterísticas de operação

A Figura 3.20 detalha o diagrama lógico simplificado de um elemento de condutância incremental. Ele mantém as vantagens dos métodos de condutância incremental e não necessita da corrente e da tensão homopolar incremental como informações de entrada (Roberts, 2001).

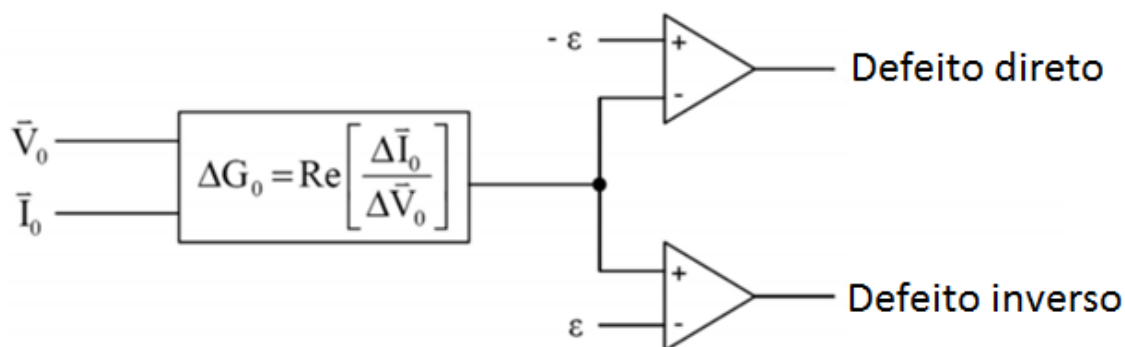


Figura 3.20 - Diagrama Lógico Simplificado de um Elemento de Condutância Incremental (32C)

3.11 Custo da Bobine de Petersen

3.11.1 Caraterísticas da bobine de Petersen

Antes de escolher a bobine de Petersen a implementar será necessário fazer o correto dimensionamento da potência reativa da bobine de Petersen.

Vamos fazer o dimensionamento da bobine para a totalidade das saídas da subestação de Serpa, que também alimenta a rede de estudo usada *a posteriori*. A rede total tem cerca de 500 Km. Sabendo que a rede é maioritariamente aérea, sabemos que a corrente capacitiva da rede é de aproximadamente 50 A.

A corrente capacitiva (I_c) foi calculada da seguinte forma:

Redes aéreas	Redes subterrâneas
1 A por cada 10 km	4 A – 5 A por cada km

No nosso caso como a rede tem 500 km.

$$I_c = \frac{500}{10} = 50 A \quad 3.3$$

3.11.2 Dimensionamento da potência reativa da bobine

De acordo com uma empresa fabricante de bobines de Petersen o dimensionamento será feito da seguinte maneira:

$$1,6 * I_c * U_s \quad 3.4$$

CAPÍTULO 3

Onde:

$$I_c = 50 \text{ A} \quad 3.5$$

$$U_s = \frac{30\,000}{\sqrt{3}} = 17\,321 \text{ V} \quad 3.6$$

Então:

$$1,6 * 50 * 17\,321 = 1385604 \text{ VAr} = 1,4 \text{ MVar} \quad 3.7$$

A bobine tem 2 regimes de funcionamento:

- Em defeito até 2 horas (ASR 1.6 KB)
- Continuamente em defeito (ASR 1.6 DB)

Assim sendo o preço final para o primeiro caso será de 32.000 € e no segundo caso de 35.000 €.

Capítulo 4

Análise de um caso de estudo

4.1 Introdução

O presente capítulo serve para expor o caso de estudo que esteve na base do desenvolvimento desta dissertação. Serviu de apoio para este estudo a rede de média tensão alimentada pela subestação de Serpa de 30 kV. Foi estudado o impacto dos diversos regimes de neutro relativamente ao valor da tensão na fase de defeito e nas fases sãs e da corrente de defeito. Pretendeu-se com este trabalho fazer uma comparação entre os 3 regimes de neutro estudados, dando particular atenção para os resultados obtidos quando se utiliza a bobine de Petersen.

Foram estudados 3 regimes de neutro, neutro usando a bobine de Petersen, com a reatância de neutro e o neutro isolado para defeitos francos e defeitos resistivos, servindo de apoio ao estudo o software DPLAN, na EDP Distribuição em Lisboa.

O DPLAN é um software desenvolvido para a EDP para auxílio das suas atividades diárias. Este software permite correr trânsitos de potência, fazer o planeamento e otimização da rede, como por exemplo, perdas, quedas de tensão, fiabilidade e qualidade de serviço, retornos financeiros e possíveis expansões da rede entre outros.

4.2 Modelização da bobine de Petersen

Uma vez que um dos principais objetivos desta dissertação é o estudo do regime de neutro utilizando a bobine de Petersen foram estudados 2 cenários diferentes. Sabendo que neste regime a corrente de defeito está relacionada com a sintonização da bobine que limita o defeito a valores muito reduzidos, mas sabendo que nunca superior a 40 A, os estudos realizados dizem respeito a 2 situações diferentes. A primeira situação em que a corrente de defeito é inferior a 40 A e a segunda situação em que é inferior a 20 A. Numa situação ideal a sintonização é feita automaticamente de modo a que a corrente de defeito seja o mais reduzido possível. Neste estudo o valor da impedância da bobine de Petersen é um valor fixo. Foi calculado o valor da impedância de modo a limitar a corrente de defeito para os 40 A e 20 A. Desprezou-se o valor da resistência uma vez que tem um valor muito baixo.

Cálculo da Impedância da Bobine

$$V_c = 30\,000\text{ V}$$

$$V_s = \frac{V_c}{\sqrt{3}} = \frac{30\,000}{\sqrt{3}} = 17\,321\text{ V}$$

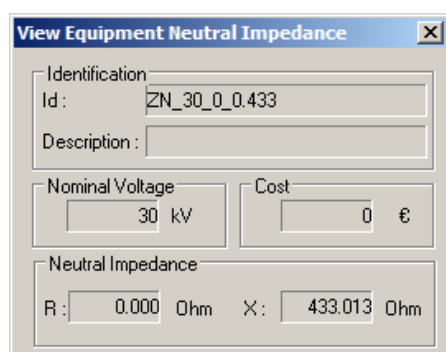
Impedância para os 40 A

$$Z = \frac{V_s}{I} = \frac{17\,321}{40} = 433,013\ \Omega$$

Impedância para os 20 A

$$Z = \frac{V_s}{I} = \frac{17\,321}{20} = 866,025\ \Omega$$

Na Figura 4.1 é possível observar a configuração da impedância da bobine de Petersen e da reatância de neutro.



The image shows a software window titled "View Equipment Neutral Impedance". It contains several input fields: "Id:" with the value "ZN_30_0_0.433", "Description:" (empty), "Nominal Voltage" set to "30 kV", "Cost" set to "0 €", and "Neutral Impedance" with "R:" set to "0.000 Ohm" and "X:" set to "433.013 Ohm".

Figura 4.1 - Configuração da Bobine de Petersen limitando a corrente de defeito a 40 A

4.3 Rede de estudo

A presente rede de estudo foi escolhida tendo em consideração as seguintes características:

- Rede de grandes dimensões
- Rede maioritariamente aérea
- Rede rural

Foram estabelecidos 5 pontos para efetuar as medições desejadas referidas anteriormente. Na Figura 4.2 podemos observar os 5 pontos, numerados de 1 a 5, onde o ponto 1 é o local onde ocorre o defeito, o 3 é a subestação de alimentação da rede e o 5 é o local mais afastado do defeito. O ponto 1, 2 e 3 são percorridos pela corrente de defeito enquanto o que os outros pontos apenas “veêm” o defeito, sendo

ANÁLISE DE UM CASO DE ESTUDO

afetados pelo mesmo. Mais à frente serão divulgados os resultados nos diversos pontos para os diferentes regimes de neutro, para defeitos francos e resistivos.

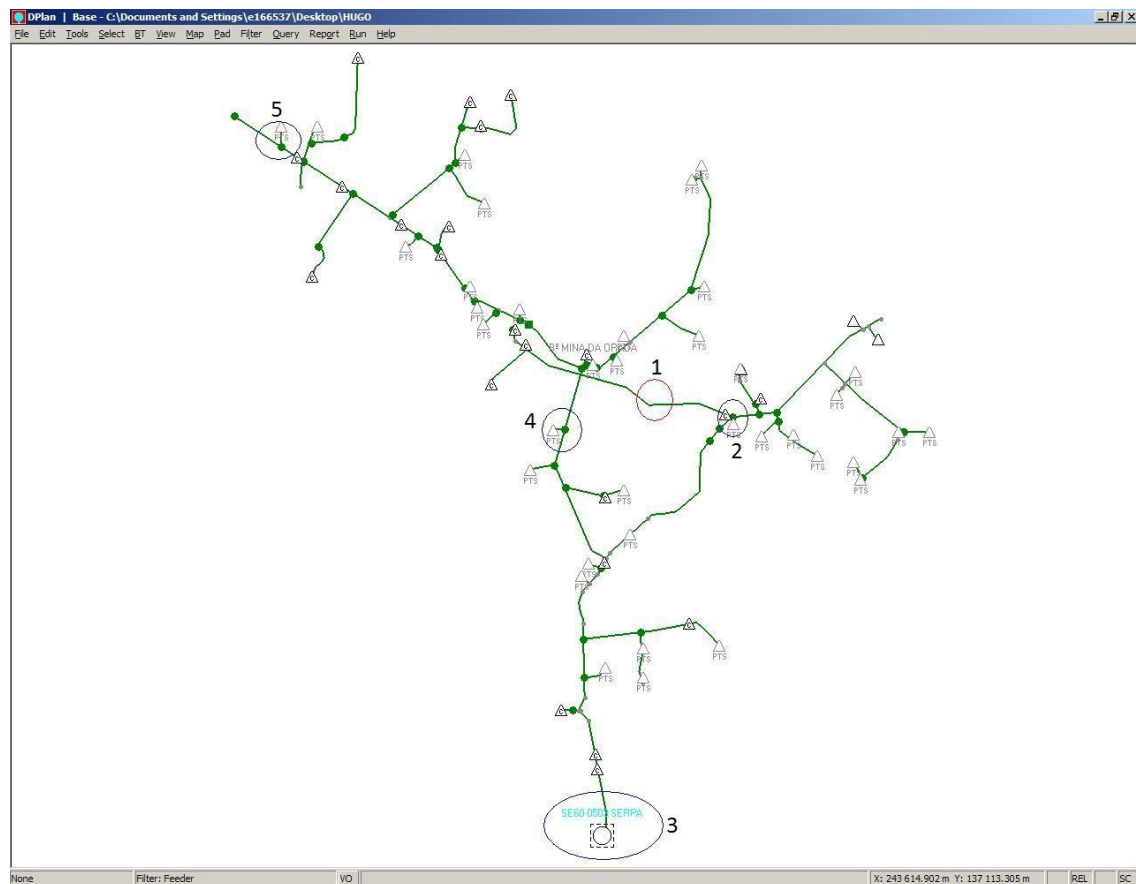


Figura 4.2 – Rede de estudo com os pontos em análise

A rede da Figura 4.2 está de acordo com os requisitos enunciados anteriormente, a rede é alimentada pela subestação de Serpa que alimenta os PT's da vizinhança em redor. A rede tem uma extensão de 127 854 m, possuindo apenas 215 m de rede subterrânea.

No regime de neutro para a bobine de Petersen foi usado uma impedância que limita a corrente de defeito para 40 A e 20 A. No regime de neutro usando a reatância de neutro foi usada uma reatância que limita a corrente de defeito a 300 A.

Foram tomadas os seguintes pressupostos:

- Não se considerou a influência das cargas, a tensão no local do defeito é sempre igual a 1 p.u;
- Estudaram-se apenas defeitos fase-terra;
- A análise dos defeitos é feita em regime permanente.

CAPÍTULO 4

Na Figura 4.3 pode-se observar o caminho que a corrente de defeito segue, desde o ponto de origem do defeito até à subestação.

Na análise que será feita posteriormente a fase em defeito é sempre a fase L1.

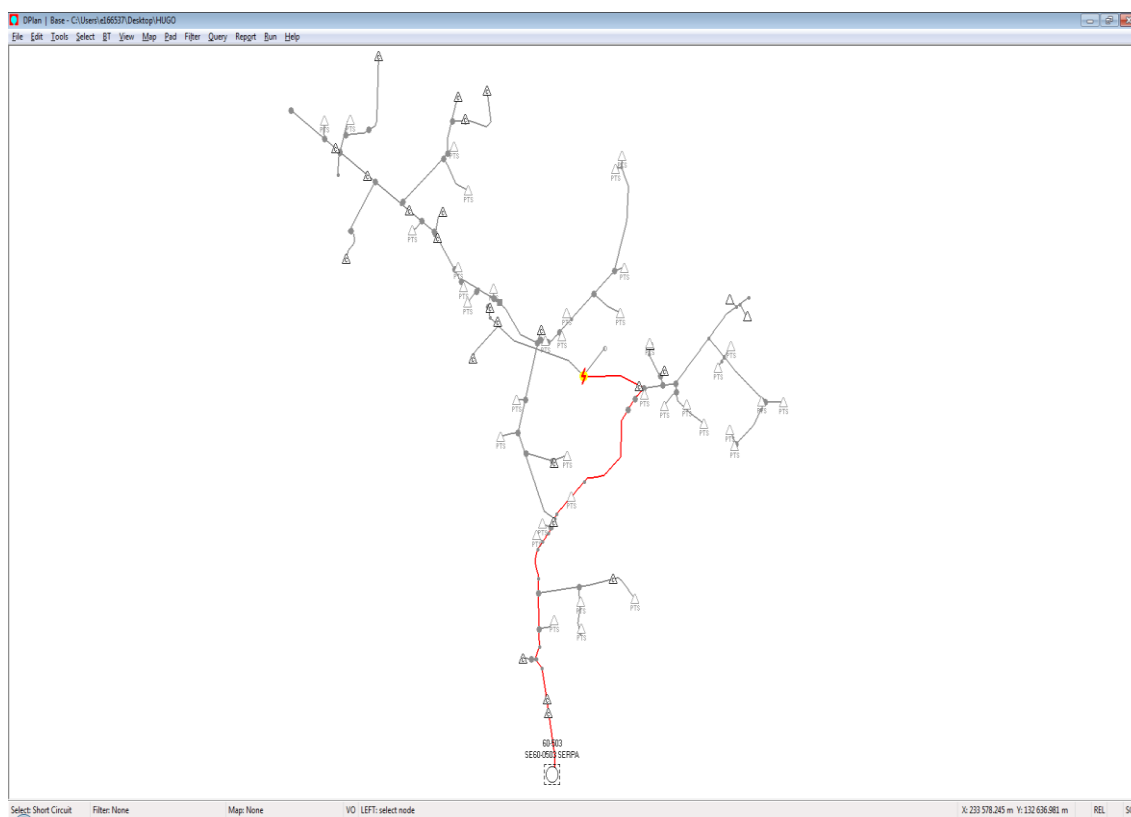


Figura 4.3 - Rede em defeito com o percurso da corrente de defeito

4.3.1 Defeitos Francos

Nas tabelas seguintes são apresentados os valores das tensões nas fases, na fase em defeito, nas fases sãs e a corrente de defeito na ocorrência de um defeito franco que ocorre no ponto 1 da rede Figura 4.2 e Figura 4.3.

Foi estudado para a bobine de Petersen 2 cenários diferentes. No primeiro limitou-se a corrente de defeito a 40 A e no segundo caso limitou-se a corrente de defeito a 20 A. Foi ainda estudado o regime de neutro usando a reatância de neutro e o neutro isolado.

Na Figura 4.4 é apresentado um gráfico com valor das tensões de forma resumida, de forma analisar rapidamente o valor das quedas de tensão para os diversos regimes.

Bobine de Petersen (40 A)

Tabela 4.1 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 40 A

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0	0	1,702	-148,6	1,681	149,8
	2	0,006	-29,7	1,699	-148,6	1,679	149,7
	3	0,042	-31,6	1,687	-148,2	1,665	149,5
	4	0,021	-30,6	1,694	-148,4	1,673	149,7
	5	0,021	-30,6	1,694	-148,4	1,673	149,7

Tabela 4.2 - Valores de corrente para bobine de Petersen limitado a 40 A

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	37,7	-88,7	0	-	0	-
	2	37,7	-88,7	0	-	0	-
	3	37,7	-88,7	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

Bobine de Petersen (20 A)

Tabela 4.3 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 20 A

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0	-	1,717	-149,3	1,706	149,9
	2	0,003	-30,3	1,715	-149,3	1,704	149,9
	3	0,022	-32,3	1,709	-149,1	1,697	149,8
	4	0,011	-31,3	1,713	-149,2	1,702	149,8
	5	0,011	-31,3	1,713	-149,2	1,702	149,8

Tabela 4.4 - Valores de corrente para bobine de Petersen limitado a 20 A

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	19,4	-89,3	0	-	0	-
	2	19,4	-89,3	0	-	0	-
	3	19,4	-89,3	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

Reatância de Neutro

Tabela 4.5 - Valores de tensão com a reatância de neutro

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0	-	1,555	-142,4	1,461	147,5
	2	0,034	-23,7	1,543	-142,1	1,448	147,2
	3	0,229	-25,7	1,478	-140,1	1,379	145,3
	4	0,113	-24,6	1,516	-141,3	1,42	146,5
	5	0,113	-24,6	1,516	-141,3	1,42	146,5

Tabela 4.6 - Valores da corrente de defeito com a reatância de neutro

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	205,4	-82,7	0	-	0	-
	2	205,4	-82,7	0	-	0	-
	3	205,4	-82,7	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

Regime de Neutro Isolado

Tabela 4.7 - Valores de tensão com o neutro isolado

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0	-	1,732	-150	1,732	150
	2	0	-	1,732	-150	1,732	150
	3	0	-	1,732	-150	1,732	150
	4	0	-	1,732	-150	1,732	150
	5	0	-	1,732	-150	1,732	150

Tabela 4.8 - Valores da corrente de defeito com o neutro isolado

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	0	-45	0	-	0	-
	2	0	-45	0	-	0	-
	3	0	-45	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

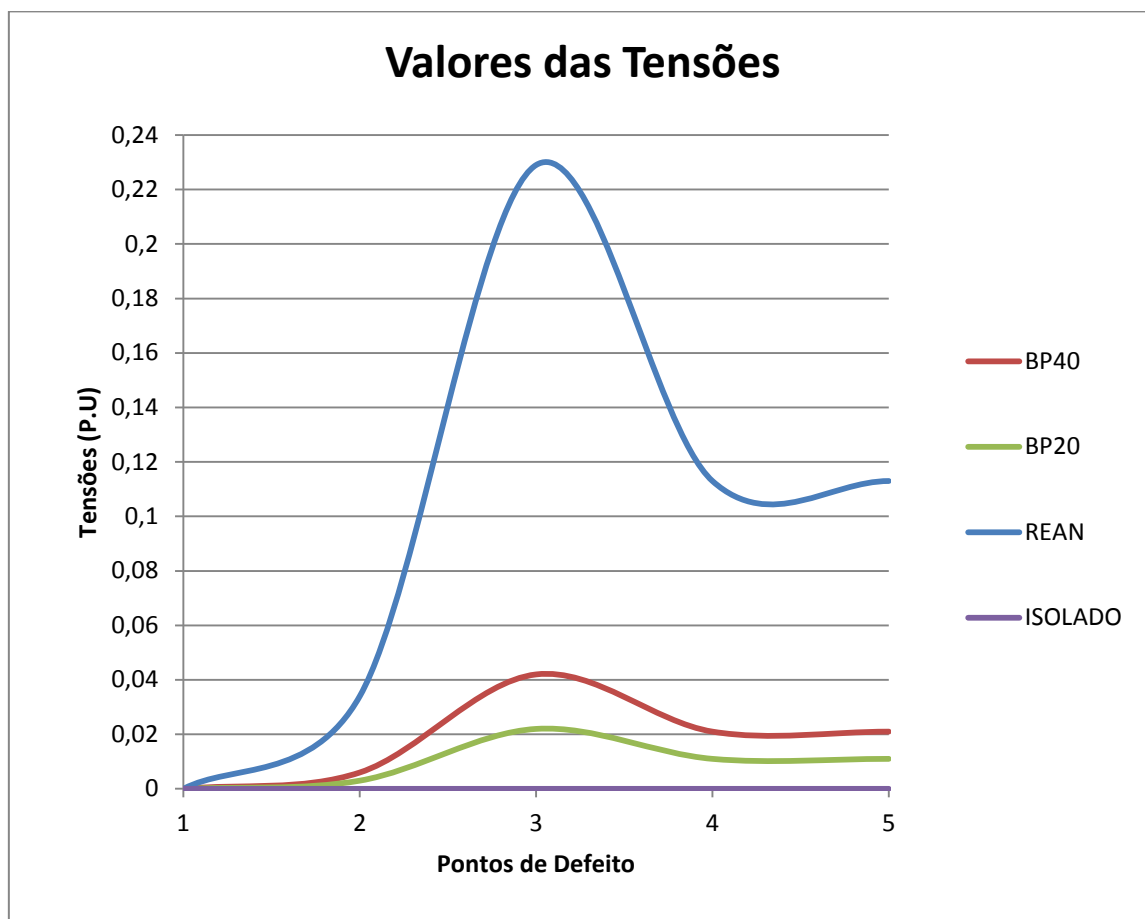


Figura 4.4 – Valores das tensões para defeitos francos

Análise conclusiva

O ponto 1 da rede diz respeito ao local onde ocorre o defeito e o ponto 2 é o local mais próximo do local do defeito da rede em estudo. Pode observar-se uma forte interferência entre o local do defeito e a tensão nesse local, sendo sempre nulo para todos os regimes na fase em defeito (Fase L1). No ponto 2 a tensão continua muito próxima de 0, sendo que no neutro isolado é sempre 0. Nas fases L2 e L3 o valor da tensão aumenta como era de esperar para valores entre 1,4 a 1,7 P.U, consoante o regime em questão e a distância ao local de defeito. Este aumento de tensão nas fases sãs, principalmente no regime de neutro usando a bobine de Petersen e no neutro isolado podem ter posto em causa o isolamento de certos equipamentos e a vida útil dos mesmos, uma vez que passamos a ter valores de tensão composta.

Excetuando o regime de neutro isolado, no ponto 3 para os restantes regimes é visível um ligeiro aumento do valor da tensão, visto que o ponto 3 se encontra na subestação de Serpa que alimenta a rede em questão. Em todos os regimes é possível observar o forte deslocamento do Ponto de neutro.

A corrente de defeito é limitado pelo regime de neutro em questão, no regime de neutro isolado a corrente de defeito é zero uma vez que a malha de defeito não se fecha não originando qualquer tipo de corrente de defeito. Usando a Bobine de Petersen é limitada a corrente de defeito a 40 A e 20 A, sendo esta uma das vantagens deste regime, em que se pode quase anular praticamente o valor da corrente de defeito, quando a bobine fica sintonizada.

Depois de ocorrer o defeito o sistema de tensões fica completamente desequilibrado, como é visível nas tabelas.

Para concluir o regime de neutro usando a reatância de neutro, é o regime em que as quedas de tensão não são tão acentuáveis, no entanto a corrente de defeito é mais elevada.

4.3.2 Defeitos resistivos

Foram feitos 4 tipos de testes resistivos, variando a impedância de defeito para se verificar as alterações sofridas. Uma vez que o valor da impedância de defeito não tem um valor unânime, já que este valor varia consoante as características do terreno e as condições no momento do defeito. Assim sendo, foram feitas várias simulações com diferentes valores, com 10, 100, 500 e 1000 ohms.

Nas tabelas seguintes são apresentados os valores das tensões nas fases, na fase em defeito, nas fases sãs e a corrente de defeito na ocorrência de um defeito resistivo (10, 100, 500 e 1000 ohms) que ocorre no ponto 1 da rede, Figura 4.2 e Figura 4.3. A razão destes diversos testes variando a resistividade do solo serviu essencialmente para ver o comportamento da rede em cada uma das situações.

Na Figura 4.5, Figura 4.6, Figura 4.7 e na Figura 4.8 é apresentado um gráfico com valor das tensões de forma resumida, de forma analisar rapidamente o valor das quedas de tensão para os diversos defeitos resistivos.

4.3.2.1 Defeitos resistivos (10 Ohms)

Bobine de Petersen (40 A)

Tabela 4.9 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 40 A

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0,022	-87,4	1,711	-148	1,67	150,4
	2	0,025	-75,5	1,709	-147,9	1,667	150,3
	3	0,057	-49,1	1,697	-147,6	1,653	150,1
	4	0,037	-59,2	1,704	-147,8	1,661	150,2
	5	0,037	-59,2	1,704	-147,8	1,661	150,2

Tabela 4.10 - Valores da corrente de defeito para bobine de Petersen limitado a 40 A

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	37,7	-87,4	0	-	0	-
	2	37,7	-87,4	0	-	0	-
	3	37,7	-87,4	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

Bobine de Petersen (20 A)

Tabela 4.11 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 20 A

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0,011	-88,7	1,722	-149	1,7	150,2
	2	0,013	-76,7	1,721	-148,9	1,699	150,2
	3	0,029	-50,3	1,714	-148,8	1,691	150,1
	4	0,019	-60,4	1,718	-148,9	1,696	150,2
	5	0,019	-60,4	1,718	-148,9	1,696	150,2

Tabela 4.12 - Valores da corrente de defeito para bobine de Petersen limitado a 20 A

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	19,4	-88,7	0	-	0	-
	2	19,4	-88,7	0	-	0	-
	3	19,4	-88,7	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

Reatância de Neutro

Tabela 4.13 - Valores de tensão com a reatância de neutro

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0,116	-76,1	1,583	-139,5	1,394	149,7
	2	0,136	-64,2	1,571	-139,2	1,382	149,3
	3	0,304	-37,7	1,503	-137,4	1,318	147,1
	4	0,198	-47,8	1,543	-138,5	1,356	148,4
	5	0,198	-47,8	1,543	-138,5	1,356	148,4

Tabela 4.14 - Valores da corrente de defeito com a reatância de neutro

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	201	-76,1	0	-	0	-
	2	201	-76,1	0	-	0	-
	3	201	-76,1	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

Regime de Neutro Isolado

Tabela 4.15 - Valores de tensão com o neutro isolado

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0	-	1,732	-150	1,732	150
	2	0	-	1,732	-150	1,732	150
	3	0	-	1,732	-150	1,732	150
	4	0	-	1,732	-150	1,732	150
	5	0	-	1,732	-150	1,732	150

Tabela 4.16 - Valores da corrente de defeito com o neutro isolado

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	0	-45	0	-	0	-
	2	0	-45	0	-	0	-
	3	0	-45	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

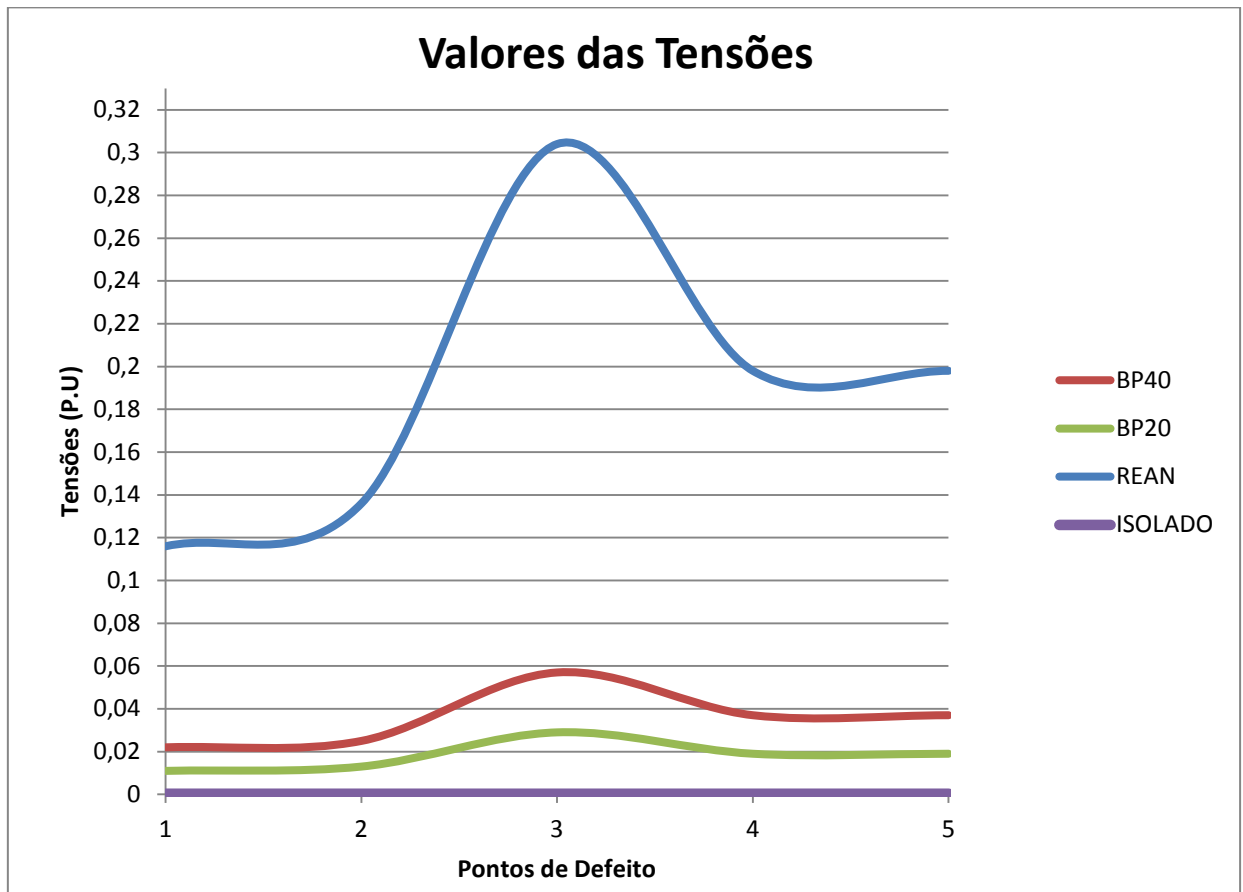


Figura 4.5 - Valores das Tensões para defeitos resistivos (10 Ohms)

4.3.2.2 Defeitos resistivos (100 Ohms)

Bobine de Petersen (40 A)

Tabela 4.17 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 40 A

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0,212	-76,4	1,77	-142,3	1,545	155,1
	2	0,215	-75,1	1,768	-142,3	1,543	155
	3	0,237	-68,1	1,755	-142	1,53	154,7
	4	0,223	-72	1,762	-142,2	1,537	154,9
	5	0,223	-72	1,762	-142,2	1,537	154,9

Tabela 4.18 - Valores de corrente para bobine de Petersen limitado a 40 A

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	36,7	-76,4	0	-	0	-
	2	36,7	-76,4	0	-	0	-
	3	36,7	-76,4	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

Bobine de Petersen (20 A)

Tabela 4.19 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 20 A

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0,111	-82,9	1,762	-146	1,641	152,9
	2	0,113	-81,5	1,761	-146	1,64	152,9
	3	0,124	-74,6	1,754	-145,9	1,633	152,8
	4	0,117	-78,5	1,758	-146	1,637	152,8
	5	0,117	-78,5	1,758	-146	1,637	152,8

Tabela 4.20 - Valores de corrente para bobine de Petersen limitado a 20 A

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	19,3	-82,9	0	-	0	-
	2	19,3	-82,9	0	-	0	-
	3	19,3	-82,9	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

Reatância de Neutro

Tabela 4.21 - Valores de tensão com a reatância de neutro

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0,721	-37,1	1,445	-122,5	0,93	146,5
	2	0,731	-35,7	1,436	-122,4	0,928	146
	3	0,805	-28,7	1,386	-122	0,921	142,9
	4	0,759	-32,7	1,416	-122,2	0,925	144,7
	5	0,759	-32,7	1,416	-122,2	0,925	144,7

Tabela 4.22 - Valores da corrente de defeito com a reatância de neutro

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	124,8	-37,1	0	-	0	-
	2	124,8	-37,1	0	-	0	-
	3	124,8	-37,1	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

Regime de Neutro Isolado

Tabela 4.23 - Valores de tensão com o neutro isolado

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0	-	1,732	-150	1,732	150
	2	0	-	1,732	-150	1,732	150
	3	0	-	1,732	-150	1,732	150
	4	0	-	1,732	-150	1,732	150
	5	0	-	1,732	-150	1,732	150

Tabela 4.24 - Valores da corrente de defeito com o neutro isolado

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	0	-45	0	-	0	-
	2	0	-45	0	-	0	-
	3	0	-45	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

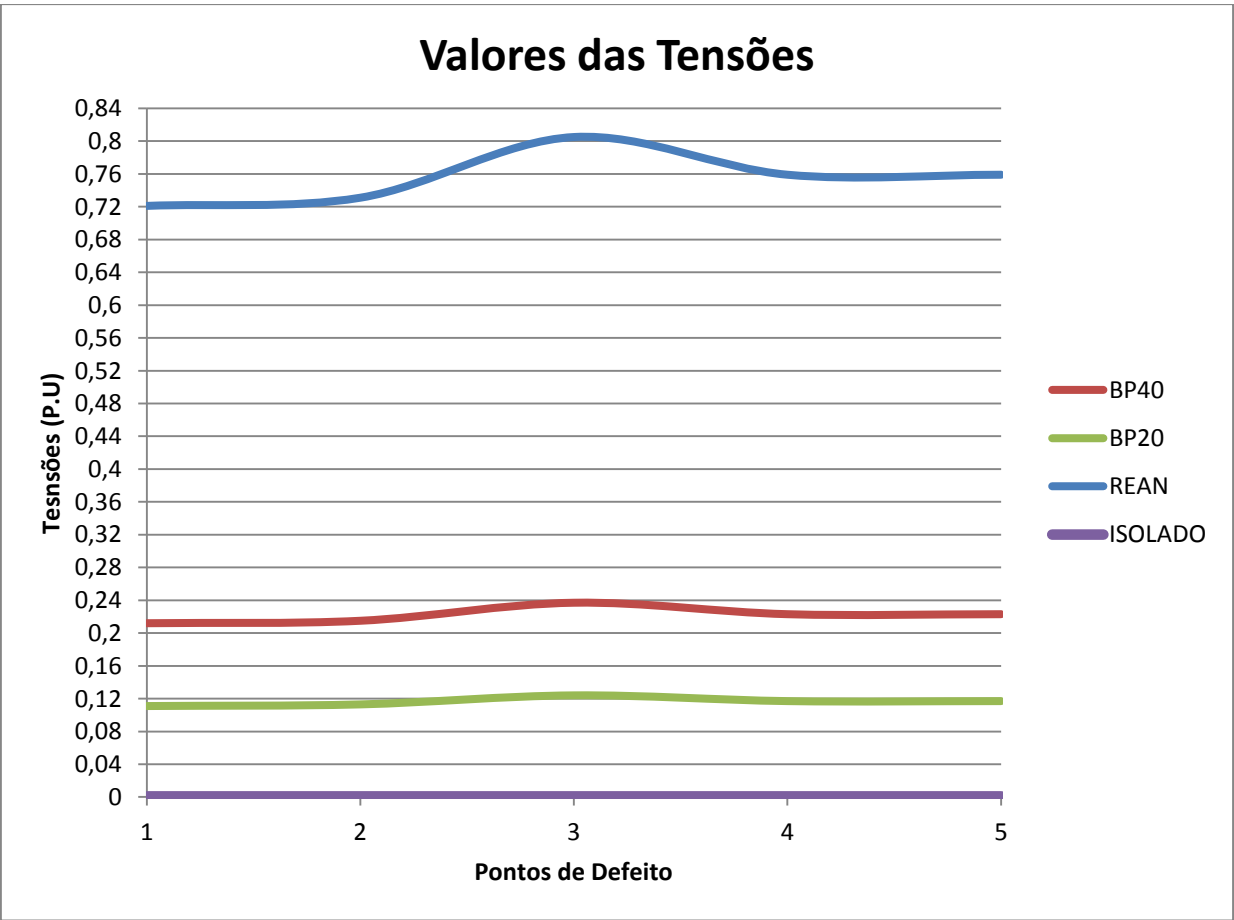


Figura 4.6 - Valores das tensões para defeitos resistivos (100 Ohms)

4.3.2.3 Defeitos resistivos (500 Ohms)

Bobine de Petersen (40 A)

Tabela 4.25 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 40 A

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0,728	-41,9	1,628	-124,7	1,007	157
	2	0,73	-41,7	1,627	-124,7	1,006	156,9
	3	0,744	-40,1	1,617	-124,6	1,002	156,4
	4	0,736	-41	1,623	-124,6	1,004	156,7
	5	0,736	-41	1,623	-124,6	1,004	156,7

Tabela 4.26 - Valores de corrente para bobine de Petersen limitado a 40 A

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	25,2	-41,9	0	-	0	-
	2	25,2	-41,9	0	-	0	-
	3	25,2	-41,9	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

Bobine de Petersen (20 A)

Tabela 4.27 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 20 A

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0,487	-60,2	1,783	-133,8	1,313	160,1
	2	0,488	-59,9	1,782	-133,8	1,312	160,1
	3	0,497	-58,4	1,776	-133,7	1,3	159,9
	4	0,491	-59,3	1,78	-133,8	1,31	160
	5	0,491	-59,3	1,78	-133,8	1,31	160

Tabela 4.28 - Valores de corrente para bobine de Petersen limitado a 20 A

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	16,9	-60,2	0	-	0	-
	2	16,9	-60,2	0	-	0	-
	3	16,9	-60,2	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

Reatância de Neutro

Tabela 4.29 - Valores de tensão com a reatância de neutro

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0,966	-9,3	1,114	-117,9	0,912	124,9
	2	0,969	-9	1,111	-117,9	0,913	124,8
	3	0,987	-7,5	1,098	-118,1	0,922	124,1
	4	0,976	-8,4	1,106	-118	0,917	124,5
	5	0,976	-8,4	1,106	-118	0,917	124,5

Tabela 4.30 - Valores da corrente de defeito com a reatância de neutro

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	33,5	-9,3	0	-	0	-
	2	33,5	-9,3	0	-	0	-
	3	33,5	-9,3	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

Regime de Neutro Isolado

Tabela 4.31 - Valores de tensão com o neutro isolado

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0	-	1,732	-150	1,732	150
	2	0	-	1,732	-150	1,732	150
	3	0	-	1,732	-150	1,732	150
	4	0	-	1,732	-150	1,732	150
	5	0	-	1,732	-150	1,732	150

Tabela 4.32 - Valores da corrente de defeito com o neutro isolado

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	0	-45	0	-	0	-
	2	0	-45	0	-	0	-
	3	0	-45	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

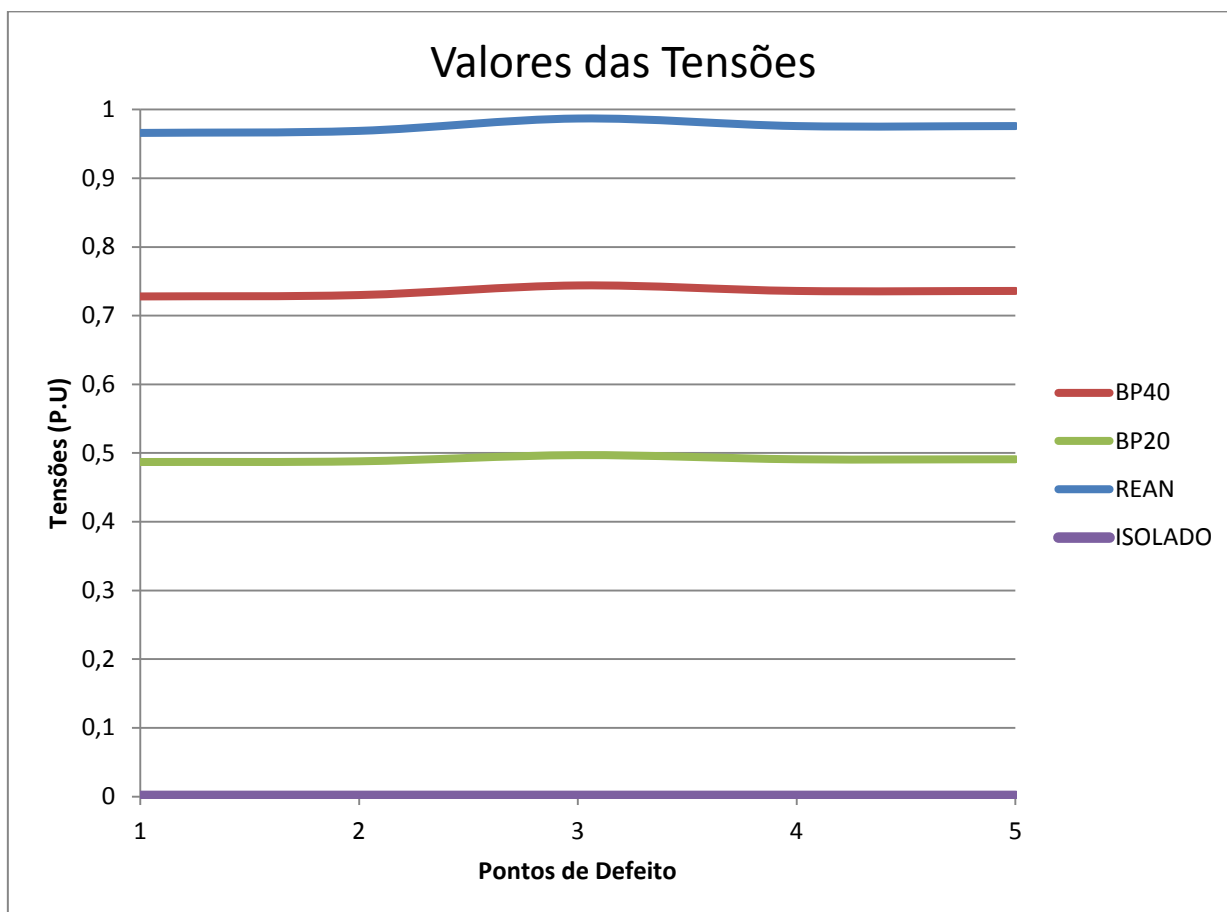


Figura 4.7 – Valores das tensões para defeitos resistivos (500 Ohms)

4.3.2.4 Defeitos resistivos (1000 Ohms)

Bobine de Petersen (40 A)

Tabela 4.33 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 40 A

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0,901	-24,4	1,393	-118,5	0,836	142,6
	2	0,902	-24,3	1,392	-118,5	0,836	142,5
	3	0,91	-23,5	1,385	-118,4	0,836	142,1
	4	0,905	-24	1,389	-118,5	0,836	142,3
	5	0,905	-24	1,389	-118,5	0,836	142,3

Tabela 4.34 - Valores de corrente para bobine de Petersen limitado a 40 A

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	15,6	-24,4	0	-	0	-
	2	15,6	-24,4	0	-	0	-
	3	15,6	-24,4	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

Bobine de Petersen (20 A)

Tabela 4.35 - Valores de tensão para bobine de Petersen limitado a 20 A

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0,742	-41,4	1,638	-124,5	1,003	157,6
	2	0,743	-41,3	1,637	-124,5	1,003	157,6
	3	0,75	-40,5	1,632	-124,5	1,001	157,3
	4	0,746	-41	1,635	-124,5	1,002	157,4
	5	0,746	-41	1,635	-124,5	1,002	157,4

Tabela 4.36 - Valores de corrente para bobine de Petersen limitado a 20 A

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	12,8	-41,4	0	-	0	-
	2	12,8	-41,4	0	-	0	-
	3	12,8	-41,4	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

Reatância de Neutro

Tabela 4.37 - Valores de tensão com a reatância de neutro

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0,986	-4,7	1,056	-118,6	0,951	122,2
	2	0,987	-4,6	1,055	-118,6	0,952	122,1
	3	0,997	-3,8	1,048	-118,8	0,957	121,8
	4	0,991	-4,3	1,052	-118,7	0,954	122
	5	0,991	-4,3	1,052	-118,7	0,954	122

Tabela 4.38 - Valores da corrente de defeito com a reatância de neutro

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	17,1	-4,7	0	-	0	-
	2	17,1	-4,7	0	-	0	-
	3	17,1	-4,7	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

Regime de Neutro Isolado

Tabela 4.39 - Valores de tensão com o neutro isolado

		Tensão nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)	Valor (P.U)	Fase (°)
Ponto	1	0	-	1,732	-150	1,732	150
	2	0	-	1,732	-150	1,732	150
	3	0	-	1,732	-150	1,732	150
	4	0	-	1,732	-150	1,732	150
	5	0	-	1,732	-150	1,732	150

Tabela 4.40 - Valores da corrente de defeito com o neutro isolado

		Corrente nas fases					
		L1		L2		L3	
		Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)	Valor (A)	Fase (°)
Ponto	1	0	-45	0	-	0	-
	2	0	-45	0	-	0	-
	3	0	-45	0	-	0	-
	4	0	-	0	-	0	-
	5	0	-	0	-	0	-

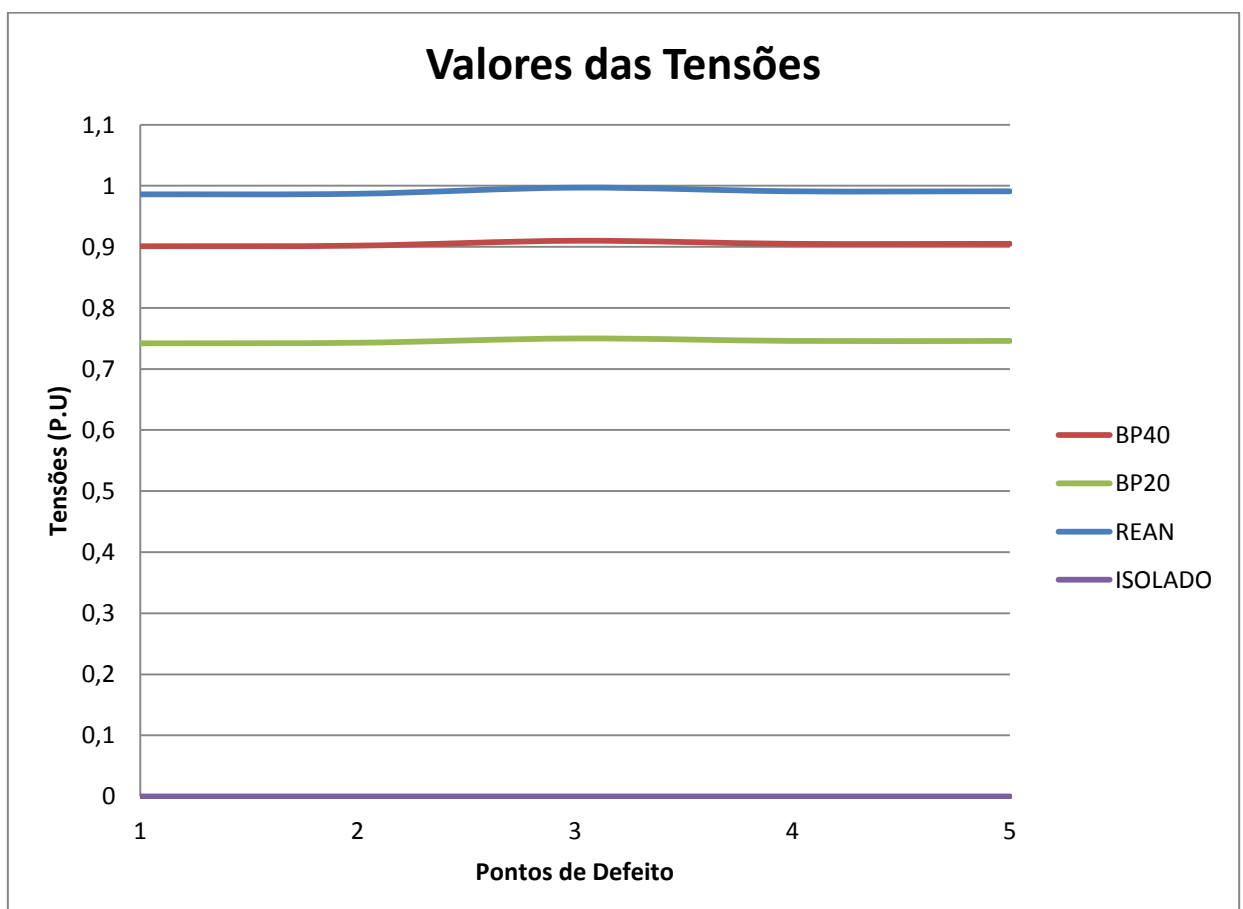


Figura 4.8 – Valores das tensões para defeitos resistivos (1000 Ohms)

Análise Conclusiva

Foram realizados 4 testes diferentes onde se variou a resistividade do solo. Neste sentido observou-se que, aumentado a resistividade do solo, a queda de tensão e a corrente de defeito em caso de ocorrência de um defeito diminui. No regime de neutro usado a reatância de neutro e a bobine de Petersen (40 A) para a resistividade na ordem dos 500 e 1000 Ohms a queda de tensão é muito pequena e o valor da tensão permanece muito próximo do 1 P.U.

De um modo geral, o aumento da tensão nas fases sãs não é tão elevado como nos defeitos francos, deste modo não haverá tantos problemas ao nível do isolamento dos materiais e da vida útil.

Tal como nos defeitos francos, nos defeitos resistivos a corrente de defeito é limitada pelo regime de neutro que se encontra implementado. Quanto menor for a corrente de defeito a limitar e maior a resistividade do solo, menor a queda de tensão na fase em defeito (L1) e menor o aumento da tensão nas fases sãs (L2 e L3), exceto para o regime de neutro isolado. Neste caso, perante a ocorrência de um defeito na fase L1, as fases sãs ficam sempre sujeitas a valores de tensão composta.

Em ambos os casos, quer para defeitos resistivos quer para defeitos francos ocorre o deslocamento do ponto de neutro.

Com as simulações realizadas no DPLAN conseguiu-se perceber o comportamento de uma rede na ocorrência de um defeito fase-terra e verificar para que grandezas tendem os valores de corrente de defeito e da tensão.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Conclusões

Este trabalho teve como principal objetivo o estudo dos diversos regimes de neutro, as suas vantagens e desvantagens e os seus sistemas de proteção. Foi estudado em mais pormenor o regime de neutro usando a bobine de Petersen, detalhando o seu modo de funcionamento, implementação, sistema de deteção de defeitos e as proteções. A dissertação incidiu, ainda, em 2 grandes grupos de redes, redes com o neutro distribuído e redes em que o neutro não está acessível.

Existem vários métodos de deteção de defeitos à terra em sistemas compensados (regime de neutro usando a bobine de Petersen), embora a solução clássica sejam os relés homopolares direcionais. O método mais utilizado é o método *watimétrico*, é simples, seguro e fiável sendo uma boa solução. No entanto, para defeitos muito resistivos, tem limitações de sensibilidade na deteção de defeitos. Esta desvantagem pode ser atenuada, colocando uma resistência em paralelo com a bobine de Petersen ou num enrolamento auxiliar na bobine. Para defeitos muito resistivos, a ligação de uma resistência reduz a tensão homopolar sem, necessariamente, aumentar a corrente de defeito homopolar. Assim sendo, este método pode ser ultrapassado por métodos mais recentes, como por exemplo o método da condutância e o método da condutância incremental.

O uso da bobine de Petersen em redes aéreas é mais vantajosa por todos os motivos já referidos anteriormente, no entanto para redes subterrâneas também pode ser aplicada com a principal vantagem de aumentar a continuidade de serviço, uma vez que a ocorrência de defeitos neste tipo de rede costuma ser permanente.

Através da utilização do software DPLAN foram obtidos os valores das tensões depois da ocorrência de defeito, tal como o valor da corrente de defeito. A bobine de Petersen apresenta quedas de tensão superiores ao regime de neutro usando reatância de neutro, no entanto com a bobine de Petersen conseguem-se obter valores de corrente de defeito muito inferiores aumentando desta forma a continuidade de serviço da rede. De facto com a bobine de Petersen caso esteja perfeitamente sintonizada a corrente de defeito é muito próxima de zero.

O estudo pormenorizado da bobine de Petersen permitiu uma análise mais rápida e segura sobre adoção deste regime de neutro. Para a EDP Distribuição o

CONCLUSÕES

estudo pormenorizado da bobine de Petersen vem aumentar o grau de conhecimento sobre este regime. O estudo aprofundado sobre o regime de neutro ressonante terá um forte impacto numa possível adoção deste regime de neutro a uma subestação em Portugal continental.

5.2 Trabalhos futuros a realizar

O trabalho aqui realizado apresenta os diversos regimes de neutro, vantagens, desvantagens e sistemas de proteções a implementar. Assim sendo os estudos realizados no decorrer desta dissertação podem servir de apoio a outros trabalhos.

- Projeto-piloto por parte da EDP Distribuição para a implementação do regime de neutro usando a bobine de Petersen numa subestação em fase de projeto ou em fase de remodelação em Portugal continental.
- Uma vez que a análise dos defeitos foi feita em regime permanente, o estudo do regime transitório na ocorrência de um defeito no regime de neutro usado a bobine de Petersen seria um trabalho interessante.

BIBLIOGRAFIA

- (ABB, 2010) ABB, "Distribution Automation Handbook", Section 8.8, Protection of Meshed Networks, Outubro 2010
- (Bjerkan, 2005) Bjerkan, E.; Venseth, T., "Locating Earth-Faults in Compensated Distribution Networks by means of Fault Indicators", *International Conference on Power Systems Transients*, Canada, 2005
- (Clement, 1993) Clement, M.; Daniel. D.; Bergeal. J., "Developments in MV Neutral Control at Electricite de France", 1993
- (Cochran, 2012) Cochran, A., "High Resistance Grounding", Acedido em 2012, <http://www.mikeholt.com/mojonewsarchive/GB-HTML/HTML/High-Resistance-Grounding~20040812.php>.
- (E.D.P, 2007) E.D.P Distribuição., "INSTALAÇÕES AT E MT. SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO", Projeto-tipo – Memória descritiva, DIT-C13-500/N, 1ª Edição, Fevereiro 2007
- (E.D.P, 2012) E.D.P., "Sistema Elétrico Português", Acedido em 2012, <http://www.edp.pt/pt/aedp/sectordeenergia/sistemaelectricoportugues/Pages/SistElectNacional.aspx>
- (E.D.P, 2012a) E.D.P. , "Guia Técnico Subestações de Distribuição", Acedido em 2012, <http://paginas.fe.up.pt/~ee97153/>
- (EGE, 2011) EGE, "ARC SUPPRESSION COILS", 2011
- (EGE, 2012) EGE, "ARC SUPPRESSION COILS", Acedido em 2012, <http://www.ege.cz/index.php?docid=276&lang=EN>
- (Electrotechnik, 2009) Electrotechnik, "Petersen Coils - Principle and Application", Acedido em 2012, <http://www.electrotechnik.net/2009/02/petersen-coils-principle-and.html>
- (Escalier, 2001) Escalier, S.; Raymongue, J.; Pinget. A.; Clément, M.; Jeanjean, R.; , "Impédances de compensation pour la mise à la terre du neutre des réseaux HTA aériens et mixtes", Spécification Technique EDF, Outubro 2001
- (Folliot, 2001) Folliot, P.; Boyer, J.M.; Bolle, S. , "NEUTRAL GROUNDING REACTOR FOR MEDIUM VOLTAGE NETWORKS", *Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482)*, vol.1, 18-21 Junho 2001
- (Fulchiron, 2001) Fulchiron, D., "Basic selection of MV public distribution networks", Cahier technique no. 203, Schneider Electric, Maio 2001
- (Grid, 2002) Grid, A. , "Network Protection & Automation Guide", Julho 2002, ISBN: 2-9518589-0-6

- (Griffel, 1997) Griffel, D.; Leitloff, V.; Harmand, Y.; Bergeal, J.; , "A new deal for safety and quality on MV networks" , *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.12, no.4, pp. 1428 – 1433, Outubro 1997
- (Hutter, 2009) Hutter, S.; "Earthing System Evaluation and Influence on Protection Performance in Resonantly Earthed MV Networks", CIGRE 2009, Croácia, 8-11 Junho 2009
- (HV Power, 2012) HV Power, "Petersen Coils – Basic Principle and Application", Abril 2012
- (HV Power, 2011) HV Power, "Resonant Earthing & Earth-fault Detection Systems", 2011
- (IEEE, 2000) IEEE, "IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems—Part I: Introduction", ISBN 0-7381-2633-0, 2000
- (Pinto de Sá, 1996) Pinto de Sá, J.L., "QUALIDADE DE ENERGIA E FILOSOFIA DE PROTECÇÕES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO", Porto, 1996
- (Prévé, 2006) Prévé, C., "Protection of Electrical Networks", ISBN-13: 978-1-905209-06-4, 2006
- (Puret, 1992) Puret, C., "MV public distribution networks throughout the world" *Cahier Technique Merlin Gerin* nº155, Março 1992
- (Roberts, 2001) Roberts, J.; Altuve, H.J.; Hou, D. , "REVIEW OF GROUND FAULT PROTECTION METHODS FOR GROUNDED, UNGROUNDED, AND COMPENSATED DISTRIBUTION SYSTEMS", 2001
- (Zizzo, 2010) Zizzo, G.; Riva Sanseverino, E.; Campocchia, A. , "Multiobjective Optimal Reconfiguration of MV Networks with Different Earthing Systems", *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International*, pp. 1-6, Agosto – Setembro 2010
- (Siemens, 2005) Siemens, "Applications for SIPROTEC Protection Relays", Germany, 2005
- (Zamora, 2004) Zamora, I.; Mazon, A.J.; Eguia, P.; Valverde, V.; Vicente, R. , "Influence of Resonant Coil Tuning in the Fault Current Magnitude", *Electrotechnical Conference, 2004. MELECON 2004. Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean*, vol. 3, pp. 979 – 982, Dubrovnik, Croácia, 12-15 Maio 2004